

การวิเคราะห์และทำนายลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพ

นายณรงค์เดช ยังสุขเกษม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**ANALYSIS AND PREDICTION OF CONSOLIDATION
CHARACTERISTICS OF BANGKOK CLAY**

Narongdet Youngsukkasem

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2007

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม : การวิเคราะห์และทำนายลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว
กรุงเทพ (ANALYSIS AND PREDICTION OF CONSOLIDATION
CHARACTERISTICS OF BANGKOK CLAY) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.
สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 82 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการอัดตัวคายน้ำและพิกัดอัตราเบิร์กของดิน เมื่อเปลี่ยนแปลงความ
เข้มข้น และชนิดประจุ (Valence) ของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยทำ
การเปรียบเทียบกับดินคาโอลิไนท์ (Kaolinite) และดินเบนโทไนท์ (Bentonite) เพื่อเสนอ
แบบจำลองการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวกรุงเทพ รวมทั้งศึกษา
อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐาน ระหว่างการเตรียม
ตัวอย่างแบบเปียกและการเตรียมแบบแห้งสำหรับดินเหนียวกรุงเทพ

ผลการศึกษาพบว่าสำหรับดินเหนียวกรุงเทพเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกของ
ของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น ค่าพิกัดเหลว ดัชนีสภาพพลาสติก อัตราส่วนการบวมตัว
อิสระ แอควิตีวี่ และขนาดของเม็ดดินเพิ่มขึ้น ดินเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้น แต่
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินมีค่าลดลง ซึ่งคล้ายกับดินคาโอลิไนท์ การเพิ่มความเข้มข้นและชนิด
ประจุของประจุบวกจะทำให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย (Flocculation) มากขึ้น
ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น ดินจึงที่บวมมาก
ขึ้นทำให้น้ำไหลผ่านดินได้ไม่สะดวก ส่วนการเตรียมดินตัวอย่างแบบแห้งจะทำให้ค่าพิกัดเหลว
ดัชนีสภาพพลาสติก และขนาดของเม็ดดินของดินเหนียวทุกชนิดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ
การเตรียมตัวอย่างแบบเปียก แอควิตีวี่มีความแตกต่างน้อยระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้ง
อย่างไรก็ตามพิกัดพลาสติกของดินเหนียวทุกชนิดไม่ได้รับอิทธิพลจากประจุบวกของของเหลวใน
ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และวิธีการเตรียมดินตัวอย่าง

ผลการศึกษาได้การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในรูปสมการ log polynomial ระหว่างตัว
แปรดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุงกับความเค้นประสิทธิผล คล้ายกับสมการที่เสนอโดย Burland
(1990) และ Nagaraj (1998) แบบจำลองนี้สามารถทำนายการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอื่นที่เคยมี
การศึกษาไว้ได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงอย่างมาก นอกจากนี้ยังเสนอแบบจำลองสัมประสิทธิ์การ
ซึมผ่านในรูปสมการนอร์มอลไลซ์ที่คล้ายกับของ Nagaraj (1998)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NARONGDET YOUNGSUKKASEM : ANALYSIS AND PREDICTION
OF CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF BANGKOK CLAY.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D.,
82 PP.

BANGKOK CLAY/COMPRESSION/FABRIC

This research studies the consolidation and its relationship to the Atterberg's limits of Bangkok clay when subjected to change in concentration and valence of cation in the clay pore fluid. Two other clays: kaolinite and bentonit were also studied for comparison. The influence of sample preparation (pre-testing condition, wet vs. Oven-dried) on the Atterberg's limits and particle size distribution was also investigated.

It was found that for Bangkok clay, the liquid limit, the plasticity index, free swell ratio, activity and particle size increase with increasing concentration and valence of the cation in the pore fluid (wet preparation). The soil is stable at a higher void ratio. But the permeability decreases. This behavior is similar to that of kaolinite soil. Increasing the concentration and the valence of the cation in the pore fluid cause the soil particles to flocculate, making it capable of absorbing more water and resisting shear stress better, while allowing less water to pass through. For dry preparation, the liquid limit, the plasticity index and particle size of all the three soils are lower than that of wet preparation. Activity is insignificantly dependent upon the pre-testing condition. However, the plastic limit of all the three soils were not affected by the cation in the pore fluid or by the sample preparation.

The study gave an equation for the consolidation curve of the three soils in the form of log polynomial equation between a modified void index and the consolidation pressure similar to that proposed by Burland(1990) and Nagaraj(1998). This equation is capable of predicting the consolidation of other clays quite accurately. The study also gave a normalized equation for the coefficient of permeability similar to that proposed by Nagaraj (1998).

School of Civil Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

การวิเคราะห์และทำนายลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติवलลภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช, อาจารย์ ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน, อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน รวมถึงอาจารย์ ดร.เชิดชนินทร์ หมคมลทิน อาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจรูปแบบ วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณนางสาวมิ่งมณี ศรีงาน และน้อง ๆ ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว (Clay mineral)	5
2.3 แร่ดินเหนียว อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ และแอกติวิตี	8
2.4 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนและดูดซับประจุไอออน (Ion exchange and sorption)	10
2.5 ปฏิกริยาร่วมระหว่างเม็ดดินและน้ำ (Soil-water interaction)	13
2.6 การชะล้างของเกลือ (Leaching)	14
2.7 ปฏิกริยาร่วมทางกายภาพและทางฟิสิกส์-เคมี (Physical and physico-chemical interaction)	14
2.8 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน	16
2.9 กลไกควบคุมพิกัดแอตเตอร์เบิร์กและความสามารถในการยุบอัดตัว	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10	เส้นสถานะเนื้อแท้ (Intrinsic State Line, ISL)	20
2.11	การซึมผ่านได้ของน้ำ	22
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	25
3.1	บทนำ	25
3.2	เตรียมดินตัวอย่างและสารเคมี	28
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	32
3.4	การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	32
3.5	การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี	33
3.5.1	การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของดิน	33
3.5.2	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ	33
3.5.3	การวิเคราะห์ความจุแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Cation Exchange Capacity, CEC)	34
3.6	การเทียบปรับสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	35
3.6.1	การเทียบปรับสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้	35
3.6.2	การเทียบปรับสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	36
3.7	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	36
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล	37
4.1	บทนำ	37
4.2	คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติพื้นฐาน และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ	37
4.3	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ต่อคุณสมบัติพื้นฐาน	40
4.4	อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อฟิสิกส์แอดเตอร์เบอร์ก และการกระจายขนาดของเม็ดดิน	46
4.5	อิทธิพลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ต่อคุณสมบัติการอัดตัว	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1	อิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง และความเค้นประสิทธิผล	52
4.5.2	อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร	54
4.5.3	อิทธิพลต่อดัชนีการอัดตัว.....	56
4.5.4	อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ.....	58
4.5.5	อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	61
4.6	เส้นสถานะเนื้อแท้	64
4.7	ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	71
5	บทสรุป.....	73
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	73
5.1.1	อิทธิพลของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติการอัดตัว	73
5.1.2	อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน	73
5.1.3	สมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้.....	73
5.1.4	สมการทำนายสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	74
5.2	ข้อเสนอแนะ	74
5.2.1	วิธีการทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว ไร้พันธะเชื่อมประสาน	74
5.2.2	วิธีการประมาณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	75
5.2.3	ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย	75
5.2.4	ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ภาคผนวก	80
	ประวัติผู้เขียน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่างแร่ประกอบดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด (สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ, 2535).....8
2.2	การจำแนกชนิดของดิน โดยอาศัยอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Prakash and Sridharan, 2004)9
2.3	แอกติวิตี้กับชนิดของดิน (Skempton, 1953)9
2.4	คุณสมบัติทางด้านเคมีของดินเหนียวกรุงเทพ (เชิดชนินทร์ หอมลมลทิน และคณะ, 2547).....15
2.5	อิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างต่อค่าพิกัดเหลวดินเหนียวประจุชนิดเดียว อะริอะเคะ (Egashira and Ohtsubo, 1981)16
3.1	การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง.....27
4.1	คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ.....38
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และชนิดของประจุบวก41
4.3	อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อพิกัดแอกเตอร์เบิร์กของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียว47
4.4	อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อแอกติวิตี้ของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียว48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ไร่พันธะเชื่อมประสาน (b) พันธะเชื่อมประสาน (Horpiulsuk et al., 2003)	5
2.2 โครงสร้างสัญลักษณ์ของแร่ประกอบดินเหนียว Kaolinite (Mitchell และ Soga, 2005)	7
2.3 โครงสร้างสัญลักษณ์ของแร่ประกอบดินเหนียว (a) Montmorillonite (b) Illite (Mitchell และ Soga, 2005)	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง PI กับแอกติวิตีของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ (Skempton, 1953)	10
2.5 การกระจายของอออนที่บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว (สุกสันต์ หอพิบูลสุขและคณะ, 2548)	14
2.6 ผลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติการกระจายขนาดของเม็ดดิน ของดินเหนียวสมุทร โคชิน (Jose et al., 1988b)	17
2.7 เส้นการอัดตัวของดินประเภทต่าง ๆ และเส้นสถานะเนื้อแท้ (Nagaraj et al., 1998)	21
2.8 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินชนิดต่าง ๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Nagaraj et al., 1998)	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge machine)	30
3.3 ดินที่ใช้ศึกษาวิจัย	31
3.4 เครื่องปั่นผสม	31
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินของดินคาโอไลน์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ.....	39
4.3 การกระจายขนาดของเม็ดดินของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุบวก.....	42
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และชนิดของประจุบวก	43
4.5 อิทธิพลของประจุบวกต่อโครงสร้างของดินคาโอลิไนท์.....	44
4.6 อิทธิพลของประจุบวกต่อ โครงสร้างของดินเบนโทไนท์.....	45
4.7 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ	49
4.8 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว	50
4.9 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อการกระจายขนาดของเม็ดดิน ของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียว	51
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของ ดินคาโอลิไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของ ดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	53
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของ ดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว	54
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของดินคาโอลิไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว.....	55
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว.....	56
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัว ของดินคาโอไลไนท์ประจุบวกชนิดเดียว.....	57
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัว ของดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	57
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัว ของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว	58
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ของดินคาโอไลไนท์ประจุบวกชนิดเดียว.....	59
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ของดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	60
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว	60
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินคาโอไลไนท์ประจุบวกชนิดเดียว.....	62
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว	62
4.24 อิทธิพลของประจุบวกต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเบนโทไนท์	63
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว	64
4.26 เส้นการอัดตัวคายน้ำและเส้นสถานะเนื้อแท้ของดินคาโอไลไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ	67
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีของอัตราส่วนโพรง	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 100 กิโลปาสกาล และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว	68
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(e_{100} - e_{1000})$ และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว	69
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง และความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง	69
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง a) e_{50} และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว b) $(e_{50} - e_{1000})$ และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว	70
4.32 เปรียบเทียบการอัดตัวคายน้ำที่ทำนายด้วยสมการ 4.1 ถึง 4.4 สำหรับดินชนิดต่าง ๆ กับผลจากการวัดจริงของ Burland (1990)	71
4.33 a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน b) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ	72

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	Activity
\AA	=	Angstrom
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
C_c	=	ดัชนีการอัดตัว
CEC	=	Cation exchange capacity
CH	=	Clay high plasticity
CL	=	Clay low plasticity
c_v	=	สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
e	=	อัตราส่วนโพรง
e_L	=	อัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว
e_{50}	=	อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 50 กิโลปาสคาล
e_{100}	=	อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 100 กิโลปาสคาล
e_{1000}	=	อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 1000 กิโลปาสคาล
FSR	=	อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ
g	=	กรัม
I_v	=	ดัชนีอัตราส่วนโพรง
I'_v	=	ดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง
k	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
kPa.	=	กิโลปาสคาล
LI	=	ดัชนีสภาพเหลว
LL	=	พิกัดเหลว
M	=	ความเข้มข้นโมลาร์
MBI	=	Methylene blue index
ml	=	มิลลิลิตร
mm	=	มิลลิเมตร
m_v	=	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก
PL	=	พิกัดพลาสติก
U	=	Average degree of consolidation
USCS	=	Unified Soil Classification System
ZPC	=	Zero point of charge
σ'_v	=	ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดินเหนียวกรุงเทพฯเป็นดินเม็ดละเอียด พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินประเภทนี้ขึ้นอยู่กับของเหลวที่อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore fluid) และพื้นผิวของอนุภาคดินซึ่งขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียว การนำดินเหนียวกรุงเทพฯไปใช้ประโยชน์ต้องเข้าใจอิทธิพลของคุณสมบัติพื้นฐานต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียว เพื่อให้สามารถออกแบบได้อย่างปลอดภัย

Olson and Mesri (1970) กล่าวว่า Terzaghi (1929) นับเป็นนักวิจัยท่านแรก ๆ ที่พยายามทำความเข้าใจกลไกการยุบอัดตัวของดินเหนียวโดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแร่ดินเหนียว และระบุว่าดินเหนียวเป็นดินที่มีค่าอัตราส่วนโพรงที่ใหญ่ และมีความสามารถในการยุบอัดตัวสูงเนื่องจากอิทธิพลขนาดและลักษณะรูปร่าง (Scale shaped) อนุภาคของแร่ดินเหนียว นอกจากนี้ Terzaghi, 1926; Terzaghi and Frohlich, 1936 ยังตั้งสมมุติฐานด้วยว่าดินเหนียวมีชั้น Semi-solid layer ของน้ำที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวเพื่อใช้อธิบายความสามารถในการซึมผ่านที่ต่ำของดินเหนียวและการอัดตัวขั้นที่สอง (Secondary consolidation) ในปัจจุบันพบว่าความสามารถในการยุบอัดตัวของดินเหนียวภายใต้น้ำหนักกดทับไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของแร่ดินเหนียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore fluid) ด้วย เช่นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุบวก (Cation) หรือค่าคงที่ระยะห่างระหว่างประจุ (Dielectric constant) (Bolt, 1956; Mitchell, 1973; Olson and Mesri, 1971; Sridharan and Rao, 1973)

นอกจากนี้ คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว อันได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัดเหลว (Liquid limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดิน นักวิจัยหลายท่านพบว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสมุทร (Marine clays) มีความแตกต่างกันตามการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ (Jose et al., (1987,1988); Bejerrum, 1954; Ohtsubo et al., (1985, 1995); Rao et al., 1991; Sridharan and Miura, 2000; Sridharan et al.,2000) โดยทั่วไปการเตรียมดินตัวอย่างมีสองวิธี คือการเตรียมตัวอย่างเปียก (Wet preparation procedure) และการเตรียมตัวอย่างแห้ง (Dry preparation procedure) (ASTM D 421-85, D 4318)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากลไกควบคุมพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ระหว่างความต้านทานแรงเฉือนที่ระดับอนุภาคของดิน (Shear resistance) และความหนาของชั้นประจุกระจายตัว (Thickness of diffuse double layer) โดยทำการเปรียบเทียบกับดินคาโอลิไนท์ (Kaolinite) และดินเบนโทไนท์ (Bentonite) ซึ่งมีพฤติกรรมทางวิศวกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกับดินชนิดอื่นได้ จะศึกษาการอัดตัวคายน้ำและพิกัดอัตรเบร์ก (Atterberg limit) ของดิน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดประจุ (Valence) ของประจุบวก และเสนอแบบจำลองระดับอนุภาคของดิน ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น และศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ เพื่อให้สามารถเลือกวิธีเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ เปรียบเทียบกับดินคาโอลิไนท์ และดินเบนโทไนท์ โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

- 1) ศึกษาการยุบอัดตัว (Compressibility) และหาความสัมพันธ์กับพิกัดอัตรเบร์กเมื่อเปลี่ยนแปลงความแรง และความเข้มข้นของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
- 2) ศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน
- 3) สร้างสมการทำนายพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (ดินเหนียวปั้นใหม่) และสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ (1) ศึกษาอิทธิพลของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ และพิกัดอัตรเบร์ก (2) ศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน ดินที่ใช้ในการทำวิจัยได้แก่ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยดินเหนียวกรุงเทพฯ เก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology) อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ส่วนดินคาโอลิไนท์ และดินเบนโทไนท์ใช้ดินเกรดการค้า (Commercial grade)

การศึกษาอิทธิพลของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินต่อพฤติกรรม การอัดตัวคายน้ำ และพิกัดอัตราเบร็ก จะนำตัวอย่างดินมาทำให้เป็นดินเหนียวประจุบวกชนิด เดียว (Homoionic clay) โดยผสมกับสารประกอบคลอไรด์ของประจุที่ต้องการ ดินเหนียวแคลเซียม จะได้จากการผสมดินกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) และดินเหนียวโซเดียมจะได้จากการ ผสมดินกับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

การศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน จะเตรียมตัวอย่างแบบ เปียกและแบบแห้ง ดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียวจากส่วนแรกจะเตรียมแบบแห้งด้วย การเตรียม แบบแห้งจะอบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- 1) การศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ จะนำเสนอกราฟการอัดตัวคายน้ำ, สัมประสิทธิ์ การอัดตัวคายน้ำ (c_v), สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k), สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง ปริมาตร (m_v), ดัชนีการอัดตัว (C_c) ตลอดจนนำเสนอสมการสำหรับใช้ทำนายการอัด ตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
- 2) อธิบายอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินทั้งสามชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้แบบจำลองพฤติกรรมการยุบอัดตัว และความสัมพันธ์กับพิกัดอัตราเบร็กของ ดินเหนียวกรุงเทพ เมื่อเปลี่ยนแปลงความแรง และความเข้มข้นของประจุบวกของ ของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน
- 2) ได้สมการทำนายการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวกรุงเทพ
- 3) ได้วิธีปรับดินเพื่อให้ได้พฤติกรรมที่ต้องการ

บทที่ 2

ปฐกษัตริ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดินเหนียวกรุงเทพเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีการทรุดตัวสูง มีพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำที่แปรผันมาก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมนี้ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เสกสรรค์ โมทาร์ตน์ (2546) ระบุว่า อุดมฤกษ์ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของดินกรุงเทพ ได้แก่ ค่าความชื้นของดิน, พิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก, หน่วยน้ำหนักมวลดิน, ความถ่วงจำเพาะของดิน, การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย (Penetration test), การทดสอบไบนีดแรงเฉือน (Vane shear test), การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test) และแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test) จากการศึกษาสรุปได้ว่าชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความหนาอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 เมตร จากนั้นจึงพบดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก และพบชั้นดินทรายแน่นและทรายปนกรวดสลับกันไปจนถึงความลึกกว่า 60 เมตร เท่าที่มีการเจาะสำรวจกันภายในความลึก 250 เมตร ยังไม่พบชั้นหิน

Mitchell (1993) กล่าวว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวขึ้นอยู่กับโครงสร้างของดิน ได้แก่แรงกระทำระหว่างเม็ดดิน และการจัดเรียงตัวของดิน (Fabric) ซึ่งคือ เม็ดดิน กลุ่มของเม็ดดิน และช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือกลุ่มของเม็ดดิน

Uddin (1995) ระบุว่าดินเหนียวกรุงเทพประกอบด้วย แร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite) 43%, แร่มอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) 33%, แร่อิลไลต์ (Illite) 19% และแร่ควอตซ์ (Quartz) 5%

Otsubo et al. (2000) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางแร่ของดินเหนียวกรุงเทพเปรียบเทียบกับดินเหนียวอะริอะเคะ (Ariake clay) ประเทศญี่ปุ่น จากการศึกษาพวกเขาสรุปว่าแร่หลักของดินเหนียวทั้งสองแหล่งเป็นแร่มอนท์มอริลโลไนท์ ซึ่งแร่ดินเหนียวเป็นชนิดบวมตัวสูง ส่งผลให้พิกัดเหลวและค่าแอกติวิตี (Activity) มีค่าค่อนข้างสูง กล่าวคือ 100% ถึง 140% และ 1.25 ถึง 1.99 ตามลำดับ

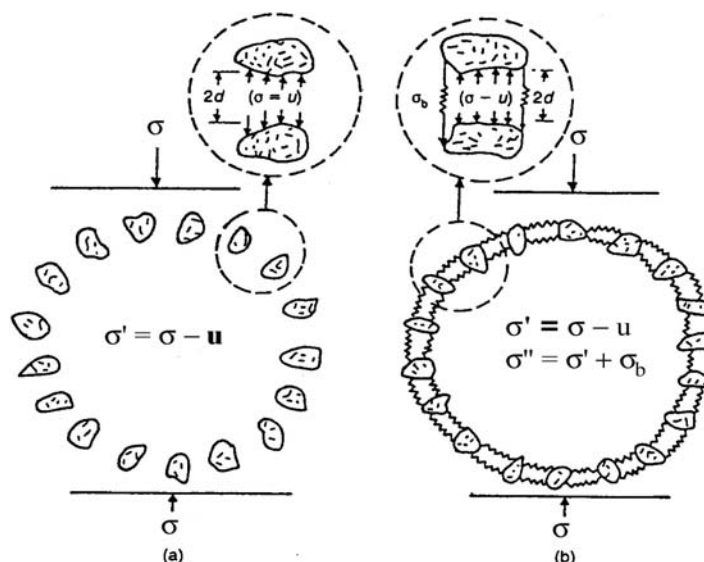
Nagaraj et al. (1990) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเหนียวเรียกว่าทฤษฎีกลุ่มก้อนของดิน (Cluster theory) และพบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมี 3 ช่วงขนาด คือ

- 1) ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน มีขนาดน้อยกว่า 20 Å

2) ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง 20 Å ถึง 200 Å

3) ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่กว่า 200 Å

Horpibulsuk et al. (2003) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และพันธะเชื่อมประสาน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ไร้พันธะเชื่อมประสาน, (b) พันธะเชื่อมประสาน

(Horpibulsuk et al., 2003)

Horpibulsuk et al. (2007) ทำการทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free swell ratio, FSR) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่าดินเหนียวกรุงเทพฯบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และเขตบางกะปิเป็นดินเหนียวบวมตัวต่ำ และมีพฤติกรรมการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามความลึก

2.2 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว (Clay mineral)

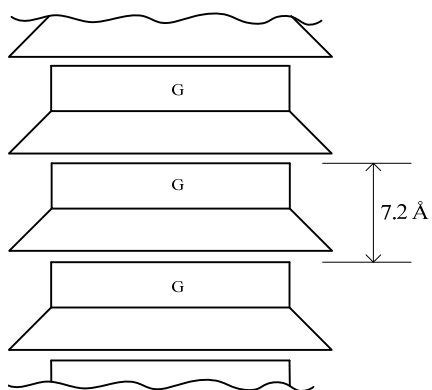
Grim (1968) ได้กล่าวว่าเป็นเวลาช้านานที่เข้าใจกันว่าดินเหนียวมีลักษณะเป็น Amorphous และมีลักษณะคล้ายเม็ดกรวดเม็ดทรายทั่วไป ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่า องค์ประกอบดินเหนียวส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพผลึก แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ Kaolinite, Montmorillonite และ Hydrus Mica หรือ Illite นอกจากนี้ยังมีพวก Vermiculite และ Chlorite ส่วนพวกที่ไม่อยู่ในรูปผลึก เรียกว่า Alloplane

Das (1985) ได้แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของแร่ดินเหนียวมีอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่

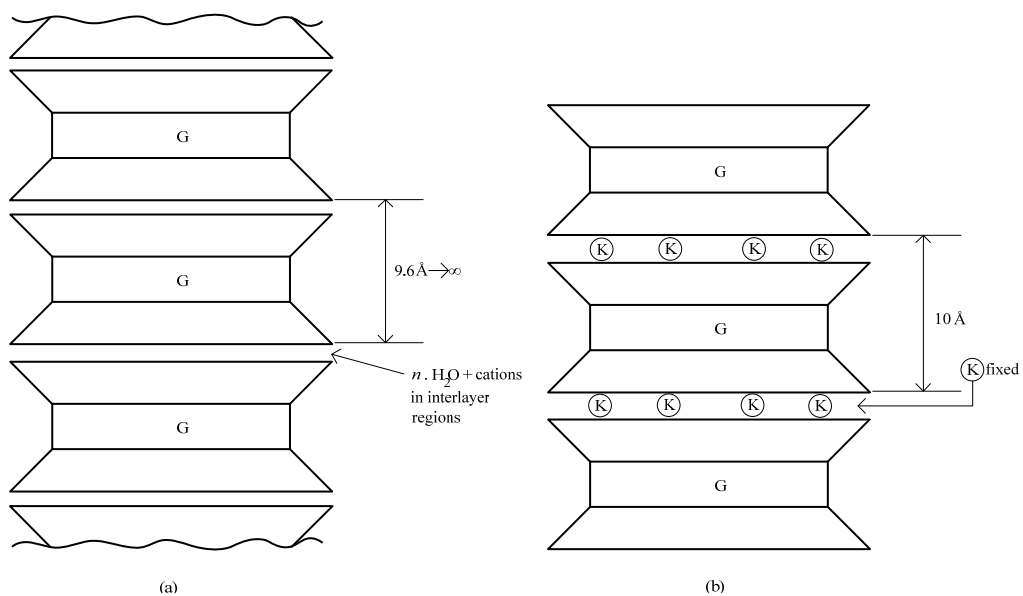
- 1) Silicon-Oxygen Tetrahedral ประกอบด้วยธาตุ Silica 1 อะตอม ล้อมรอบด้วย Oxygen 4 อะตอม เป็นรูปทรงที่มีช่องรูปสี่ด้านเชื่อมต่อกัน เรียกว่า Silica sheet
- 2) Aluminum หรือ Magnesium Octahedral ประกอบด้วยธาตุ Alumina หรือ Magnesium 1 อะตอม ล้อมรอบด้วย Oxygen 6 อะตอม เป็นรูปทรงที่มีช่องแปดด้านเชื่อมต่อกัน Alumina ที่เชื่อมต่อกันเป็นแผ่น เรียกว่า Gibbsite sheet สำหรับ Magnesium ที่เชื่อมต่อกันเป็นแผ่นเรียกว่า Brucite sheet

ชนิดของแร่ประกอบดินเหนียวที่สำคัญมีดังนี้

- 1) Kaolinite โครงสร้างเป็นประเภท Two-Layer sheet ที่พบมาก นอกจาก Kaolinite แล้ว ยังมี Halloysite และ Dickite Kaolinite มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ โครงสร้างประกอบด้วยแผ่น Silica sheet ประกบกับแผ่น Gibbsite sheet ดังรูปที่ 2.2 ขนาดของโครงสร้างจะขยายตัวออกไปในแนวราบโดยไม่จำกัด ระหว่างโครงสร้างผลึกจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ทำให้โมเลกุลของน้ำและไอออนไม่สามารถแทรกตัวอยู่ได้ ทำให้ดินเหนียวประเภทนี้ไม่ขยายตัวและหดตัวมากนักเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลง ดินเหนียวประเภทนี้ถือได้ว่ามีเฉพาะ External surface ไม่มี Internal surface ดังนั้นการดูดซับไอออนบวกจึงมีค่าน้อย ดินเหนียวประเภทนี้มักมีการเรียงตัวแน่น
- 2) Montmorillonite โครงสร้างเป็นประเภท Three-layer sheets ที่พบมากนอกจาก Montmorillonite แล้ว ยังมี Beidellite, Nontronite, Saponite โดย Montmorillonite มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Si}_8(\text{Al}_{3.34}\text{Mg}_{0.66})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ โครงสร้างประกอบด้วยแผ่น Silica sheet สองแผ่น และ Gibbsite sheet หนึ่งแผ่นอยู่ระหว่างกลาง ดังรูปที่ 2.3 ระหว่างแผ่นไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้โมเลกุลของน้ำและไอออนต่าง ๆ สามารถแทรกตัวอยู่ภายใน Internal surface ได้ การพองตัวและหดตัวสูงเมื่อความชื้นของดินเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการดูดซับน้ำและไอออนบวกสูง โครงสร้างผลึกไม่แข็งแรง และมี Specific surface สูงมาก
- 3) Illite โครงสร้างเป็นประเภท Three-layer sheets โครงสร้างโดยทั่วไปเหมือนกับพวก Montmorillonite แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระยะระหว่างแผ่นผลึกมีระยะคงที่เนื่องมาจาก Si อะตอมบางส่วนถูกแทนที่โดย Al อะตอม ดังนั้นประจุที่เหลือค้างจะถูกดุลชดเชยโดย K อีออน ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นสูตรทางเคมีของ Illite จึงเขียนสูตรทางเคมีได้เป็น $\text{K}_{1.33}(\text{Si}_{6.66}\text{Al}_{1.33})\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ ซึ่งทำให้ระยะระหว่างแผ่นผลึกไม่ยับเยินเมื่อ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสัญลักษณ์ของแร่ประกอบดินเหนียว Kaolinite
(Mitchell และ Soga, 2005)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสัญลักษณ์ของแร่ประกอบดินเหนียว (a) Montmorillonite (b) Illite
(Mitchell และ Soga, 2005)

สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ (2535) ได้สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของแร่ดินเหนียว Kaolinite, Montmorillonite, และ Illite แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่างแร่ประกอบดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด
(สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ, 2535)

สมบัติ	ชนิดของแร่ดินเหนียว		
	Montmorillonite	Illite	Kaolinite
ขนาดของผลึก (μm)	0.01-1.0	0.1	0.1-5.0
รูปร่าง	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางรูป หกเหลี่ยม
พื้นที่ผิวภายนอก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
พื้นที่ผิวภายใน	สูงมาก	ปานกลาง	ไม่มี
ความเหนียวและอ่อนตัว (Cohesion and plasticity)	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การขยายตัว (Swelling capacity)	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Cation exchange capacity (meq/100 gm.)	80-100	15-40	3-15

2.3 แร่ดินเหนียว อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ และแอคติวิตี

คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว อันได้แก่ พิกัดเหลว กำลังต้านทานแรงเฉือน และการอัดตัวแล้วแต่แปรผันตามแร่ดินเหนียว วิธีวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียวที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ X-ray diffraction analysis, Differential thermal analysis และ Electron microscopy การทดสอบเหล่านี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์แร่ดินเหนียว Prakash and Sridharan (2004) ได้เสนอมาตรฐานการทดสอบโดยใช้ตัวแปรที่เรียกว่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ และมีนิยามดังสมการ 2.1

$$FSR = \frac{v_d}{v_k} \quad (2.1)$$

เมื่อ v_d และ v_k คือปริมาตรของดินขนาดเล็กกว่า 425 mm. จำนวน 10 กรัม ที่ตกตะกอนในน้ำกลั่น และสารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetra chloride, CCl_4) ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชนิดของแร่ดินเหนียวสามารถบ่งบอกโดยอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของดินโดยอาศัยอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ

(Prakash and Sridharan, 2004)

FSR	การบวมตัวของดิน	แร่ดินเหนียว
≤ 1.0	ไม่มีการบวมตัว	คาโอลิไนท์
1.0-1.5	ต่ำมาก	คาโอลิไนท์และมอนท์มอริโลไนท์
1.5-2.0	ปานกลาง	มอนท์มอริโลไนท์
2.0-4.0	สูง	มอนท์มอริโลไนท์
> 4.0	สูงมาก	มอนท์มอริโลไนท์

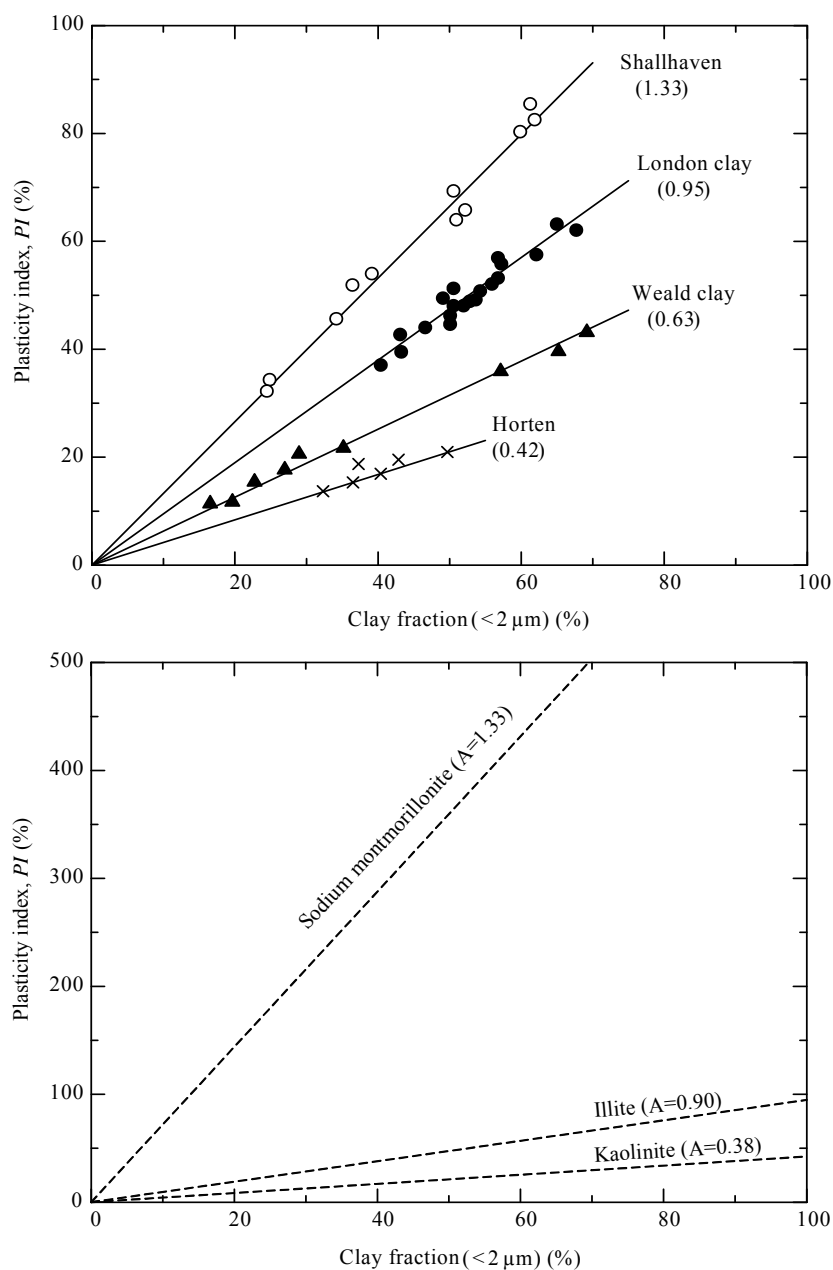
Skempton (1953) นำเสนอค่าแอกติวิตี (Activity, A) และสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$A = \frac{PI}{\% \text{ by weight finer than } 2 \mu\text{m}} \quad (2.2)$$

นอกจากนี้ยังระบุด้วยว่าคุณสมบัติของดินเหนียวถูกควบคุมโดยลักษณะทางกายภาพและเคมีของแร่ต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นดิน ถ้าทำการพล็อตค่า PI กับเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 2 ไมครอนเทียบโดยน้ำหนัก จะได้กราฟเส้นตรงที่สามารถลากต่อกลับไปยังจุดกำเนิดดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยความชันของกราฟเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดิน และค่านี้สามารถใช้แบ่งประเภทของดินดังแสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 แอกติวิตีกับชนิดของดิน (Skempton, 1953)

แอกติวิตี	ชนิดของดิน
< 0.75	Inactive clay
0.75-1.25	Normal clay
> 1.25	Active clay



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง PI กับแอกติวิตีของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ (Skempton, 1953)

2.4 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนและดูดซับประจุไอออน (Ion exchange and sorption)

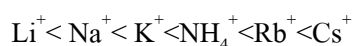
สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ (2535) ได้กล่าวว่าอนุภาคดินเหนียวเมื่ออยู่ในธรรมชาติจะดูดซับไอออนบวกไว้เต็มไปหมด ไอออนบวกที่พบมากในดินเรียงจากมากไปหาน้อย คือ H^+ (Al^{3+}) $> Ca^{2+}$ $> Mg^{2+}$ $> K^+$ และ Na^+ ไอออนบวกเหล่านี้เรียกว่า Adsorbed cation โดย Adsorbed cation เหล่านี้จะถูกแทนที่หรือไล่ที่โดยไอออนบวกอื่น ๆ ได้ง่าย การแลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นสมมูลย์ ซึ่ง

1) Valence ของไอออนบวกโดยทั่วไป ไอออนที่มี Valence สูงย่อมมี Replacing power สูงกว่าไอออนบวกที่มี Valence ต่ำ เช่น Al^{3+} เข้าแทนที่ Ca^{2+} ได้ดีกว่า และ Ca^{2+} เข้าแทนที่ Na^+ ได้ดีกว่า สำหรับไอออนบวกที่มี Valence เท่ากัน Replacing power จะขึ้นอยู่กับ Ionic size

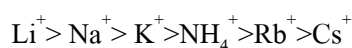
2) Ionic Size ขนาดของไอออนบวก หมายถึงขนาดของ Hydrated cation คือ รวม Water Shell ที่ห่อหุ้มไอออนบวกนั้น ๆ ด้วยการลำดับขนาดจริง และขนาดที่รวมทั้ง Water shell ของไอออนบวกที่สำคัญดังนี้

(I) Monovalent

- Ionic size (Dehydrated)

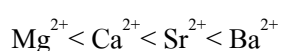


- Ionic size (Hydrated)

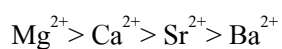


(II) Divalent

- Ionic size (Dehydrated)



- Ionic size (Hydrated)



ดังนั้น Replacing power จะขึ้นอยู่กับขนาด Hydrated ionic size ของไอออนบวกนั้น เช่น Cs^+ จะมี Replacing power สูงกว่า Li^+ เพราะขนาด Water shell ของ Cs^+ ใหญ่กว่า Li^+

3) ความเข้มข้นของ Replacing cation Ca^{2+} มี Replacing power สูงกว่า Na^+ แต่ถ้ามี Na^+ เป็นจำนวนมากก็จะสามารถไล่ที่ Ca^{2+} ได้

4) ระดับการอิ่มตัว (Degree of saturation) ระดับการอิ่มตัวของไอออนบวกบางชนิดที่ดูดซับที่ผิวอนุภาคดินเหนียวจะมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่ไอออนนั้นจะถูกไล่ที่ออกมา เช่น Ca^{2+} ที่ผิวดินเหนียวเหลือน้อยเท่าไร การไล่ที่ให้หมดยังทำยาก ในทางตรงข้าม Na^+ ยิ่งเหลือน้อยเท่าไรยิ่งเป็นการง่ายในการไล่ที่

- 5) อีออนบวกอื่น ๆ ที่อยู่รวมบนผิวอนุภาคดินเหนียว ในบางครั้งอีออนบวกอื่น ๆ ที่ดูดซับบนอนุภาคดินเหนียวร่วมกับอีออนบวกที่ต้องการจะไล่ที่นั่นก็มีบทบาทสำคัญ เช่น K^+ จะถูกไล่ที่ได้ง่ายเมื่ออยู่ร่วมกับ Al^{3+} หรือ H^+ จะถูกไล่ที่ได้ยากเมื่ออยู่ร่วมกับ Ca^{2+}

สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ (2535) ระบุว่าอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบเนื่องมาจากสาเหตุสองประการ คือ

- 1) เกิดขึ้นบริเวณขอบของผลึก (Exposed crystal edges) ประจุประเภทนี้เป็นประจุลบที่เกิดขึ้นได้สองประการ คือ จากบริเวณขอบผลึกที่แตกหักออกไป ทำให้ O ซึ่งแต่เดิมเคยเกาะอยู่กับ Si และ Al ใน Silica และ Alumina sheet มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเกิดสภาพนี้มาก ๆ ทำให้ประจุลบมากพอที่จะดูดซับอีออนบวก อีกสาเหตุหนึ่งคือเกิดจากการ Ionization ของ H ซึ่งเกาะอยู่กับ O ในส่วนที่เป็น Alumina sheet จะเกิดขึ้นในดินเหนียวชนิด 1 : 1 การเกาะยึดของ H และ O จะไม่แข็งแรงเหมือน Hydroxyl group เมื่อ H Dissociate มากจะทำให้เกิดประจุลบมาก
- 2) เกิดขึ้นจากกระบวนการ Isomorphous substitution คือ การเข้ามาแทนที่ของอะตอมที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่มี Valence ไม่เท่ากัน ถ้าอีออนบวกที่มี Valence ต่ำเข้ามาแทนที่อีออนบวกที่มี Valence สูงกว่าจะทำให้เกิดประจุลบในโครงสร้าง ในทางตรงข้ามถ้าอีออนบวกที่มี Valence สูงเข้าไปแทนที่อีออนบวกที่มี Valence ต่ำก็จะทำให้โครงสร้างเกิดประจุบวก

Grim (1968) กล่าวว่าการศึกษาปฏิกิริยา Anion exchange ในดินเหนียวศึกษาได้จากการดูดซับ Phosphate อีออนของดิน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า โอกาสที่อนุภาคดินเหนียวจะเกิดปฏิกิริยา Anion exchange มีน้อย จากการศึกษาการดูดซับ Phosphate อีออนของดินเหนียว Kaolinite พบว่าเกิดจากการแทนที่ OH^- ในโครงสร้างแร่ประกอบดินเหนียว หรือปฏิกิริยาระหว่าง Phosphate กับ Alumina เมื่อโครงสร้างผลึกถูกทำลายลง ประเภทของปฏิกิริยา Anion exchange ในดินเหนียวพอสรุปได้ดังนี้

- 1) เกิดจากการแลกเปลี่ยนอีออนลบในสารละลายกับ OH^- ในโครงสร้างของดินเหนียว ปฏิกิริยานี้มักเกิดในดินพวก Kaolinite
- 2) ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอีออนลบ เกี่ยวข้องกับรูปทรงเรขาคณิตของอีออนลบ และโครงสร้างผลึก เช่น Phosphate, Arsenate, Borate เป็นต้น มีขนาดและรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกับ Silica tetrahedral จึงอาจถูกดูดซับเข้ากับแร่ Silica tetrahedral sheet ทำให้แผ่นแร่ขยายตัวออกไป อีออนลบอื่น เช่น Sulphate, Chloride, Nitrate เป็นต้น มีขนาดไม่พอเหมาะเข้ากับแร่ Silica tetrahedral sheet จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ

จากกรณีที่ 1 และ 2 ปฏิกริยา Anion exchange เกิดขึ้นบริเวณขอบรอบอนุภาคของดินเหนียวสำหรับดิน Smectite จะไม่มีปฏิกริยา Anion exchange ใน Basal plane surface สำหรับดิน Kaolinite cation exchange ที่เกิดจาก Broken bond จะมีค่าเท่ากับ Anion exchange

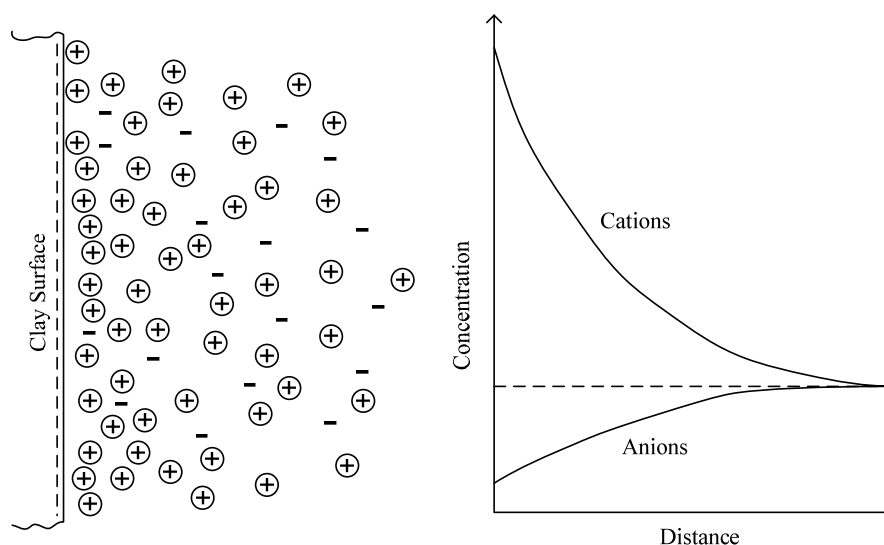
Anion exchange capacity ของดิน Sassafrass soil เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวแร่ ค่า Anion exchange capacity จะเปลี่ยนแปลงตามการจัดโครงสร้างผลึก (Degree of crystallinity) ของดินเหนียว ค่า Anion exchange capacity จะแปรเปลี่ยนตามความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก และระบุได้ว่า Anion exchange ไม่สามารถเปรียบเทียบกับ Cation exchange เนื่องจากธรรมชาติของ Cation exchange มีผลมากกว่า Anion exchange นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่า pH ของดิน

2.5 ปฏิกริยาร่วมระหว่างเม็ดดินและน้ำ (Soil-water interaction)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2548) รายงานว่าผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นประจุลบ และเนื่องจากน้ำมีแรงแบบสองขั้ว (Dipole) ดังนั้นจึงเกิดปฏิกริยาระหว่างดินและน้ำ โดยเกิดบริเวณผิวสัมผัส โดยเฉพาะดินเหนียว น้ำที่อยู่ในดินมีอิทธิพลอย่างมากเนื่องจากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวที่มาก ปฏิกริยาระหว่างดินเหนียวและน้ำ ส่งผลให้เกิดแรงผลักกันระหว่างอนุภาคดินเหนียว และการแยกตัวของอออนประจุบวกในน้ำเพื่อทำให้เกิดสมดุลทางไฟฟ้า ความแรงของประจุบวกจะมีค่าน้อยลงตามระยะทางจากผิวของดินเหนียว ขณะที่ความแรงของประจุลบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Silva (1974) กล่าวว่าในสารแขวนลอยระหว่างอนุภาคน้ำและอนุภาคดิน อนุภาคดินกับอนุภาคอิสระของน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดินเหนียวจะเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันอย่างไม่มีทิศทาง ส่งผลให้อนุภาคดินเหนียวเคลื่อนตัวแบบไร้ทิศทาง เรียกว่าการเคลื่อนตัวแบบบราวเนียน การเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางนี้จะทำให้อนุภาคดินเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและอยู่ในสภาวะสมดุลด้วยแรงระหว่างอนุภาคดิน ดังนั้น พฤติกรรมของดินจะขึ้นอยู่กับแรงสุทธิระหว่างอนุภาคดิน

ถ้าแรงสุทธิระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงผลักรการจัดเรียงตัวระหว่างเม็ดดินและน้ำจะเป็นแบบกระจัดกระจาย ในกรณีที่อนุภาคดินเป็นแร่ดินเหนียวชนิดเดียวกันและสารแขวนลอยระหว่างน้ำและอนุภาคดินมีความสม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงสุทธิระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงดึงดูดเนื่องจากความเข้มข้นของประจุบวก อนุภาคดินมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Coagulation) ถ้าอนุภาคดินในสารแขวนลอยมีขนาดแตกต่างกัน อนุภาคดินที่ใหญ่กว่าจะรวมกับอนุภาคดินที่เล็กกว่าและเกิดเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ตกตะกอนเร็วขึ้น การตกตะกอนแบบนี้เป็นการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคดิน และก่อให้เกิดกลุ่มของเม็ดดินจำนวนมาก ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 2.5 การกระจายของไอออนที่บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว
(สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ, 2548)

2.6 การชะล้างของเกลือ (Leaching)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2548) รายงานว่าการชะล้างของเกลือในดินสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความลาดเชิงชลศาสตร์หรือการแพร่กระจาย การชะล้างจะเกิดขึ้นได้ต้องมีน้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลั่นนำพา การชะล้างของเกลือจึงอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลซึมของน้ำฝน หรือการไหลขึ้นของน้ำใต้ดิน

Skempton and Northey (1953) และ Bjerrum (1973) ทำการค้นคว้าพบว่าพิกัดเหลวและกำลังต้านทานแรงเฉือนที่สภาวะปั่นใหม่ (Remoulded shear strength) ของดินเหนียวอ่อนที่มีความไวตัวสูง (Sensitive soft clay) จะมีค่าลดลงตามปริมาณเกลือที่ลดลง การทดสอบดังกล่าวยังกล่าวอีกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่สภาวะปั่นใหม่มีค่าขึ้นอยู่กับดัชนีสภาพความเหลวเพียงอย่างเดียว

2.7 ปฏิกริยาร่วมทางกายภาพและทางฟิสิกส์-เคมี (Physical and physico-chemical interaction)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2548) รายงานว่าระหว่างอนุภาคดินสองอนุภาคจะต้องมีแรงกระทำระหว่างอนุภาคซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแรงดึงดูดและแรงผลัก แรงเหล่านี้ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกัน คือแรงระยะสั้นและแรงระยะไกล ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมขึ้นอยู่กับว่าแรงกลุ่มใดมีอิทธิพลมากกว่า แรงระยะไกลสามารถกระทำได้ในระยะที่ไกลหลาย

เชิดชนินทร์ หอมมลทิน และคณะ (2547) รายงานผลการทดสอบคุณสมบัติเคมีฟิสิกส์ของดินเหนียวกรุงเทพ โดยดินเหนียวตัวอย่างเก็บจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางด้านเคมีของดินเหนียวกรุงเทพ
(เชิดชนินทร์ หอมมลทิน และคณะ, 2547)

Depth, m	pH	EC Ds/m	Exch.cation (cmol/kg)			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
3.0-3.5	7.3	0.32	22.4	12.3	0.7	2.2
3.5-5.0	7.9	1.29	20.9	28.6	1.7	7.6
6.0-6.5	7.8	1.04	24.9	21.2	1.1	4.2
7.5-8.0	7.8	2.32	17.7	28.5	2.2	12.6
9.0-9.5	8.1	0.77	14.5	24.6	2.3	17.4
10.5-11.0	7.9	2.43	14.3	22.6	2.2	18.7
12.0-12.5	-	5.47	17.6	31.0	1.9	23.0

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าดินเหนียวกรุงเทพบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประกอบด้วยประจุบวกหลายชนิดยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคของดินเหนียว แต่การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะอิทธิพลของ Na⁺ และ Ca²⁺ เท่านั้น

2.8 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน

คุณสมบัติพื้นฐานของดินอันได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัดเหลว และพิกัดพลาสติก มีความสำคัญอย่างมากต่อการวิเคราะห์และออกแบบงานทางด้านวิศวกรรมปฐพี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ถึงแม้ว่าจะมีนักวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม และคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสมุทร (Marine clays) (Jose et al. (1987, 1988); Bejerrum, 1954; Ohtsubo et al. (1985, 1995); Rao et al., 1991; Sridharan and Miura, 2000; Sridharan et al., 2000) แต่การศึกษาดังกล่าวไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ

Sridharan et al. (1986, 1988) ระบุว่าค่าพิกัดเหลวมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดินเหนียว อันได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือนในสถานะไม่ระบายน้ำ Maximum proctor density, Proctor optimum moisture content, California bearing ratio ความสามารถในการยุบอัดตัว ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ พื้นที่ผิวสัมผัส และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

Egashira and Ohtsubo (1981) ทำการทดสอบพิกัดเหลวดินเหนียวประจุชนิดเดียว (Homoionic clay) ของดินเหนียวอะริอะเคะ ประเทศญี่ปุ่น จากการศึกษาพบว่า เมื่อเตรียมตัวอย่างแบบแห้งโดยอากาศ พิกัดเหลวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดเหลวที่ใช้ความชื้นสนามของดิน (Field moisture) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

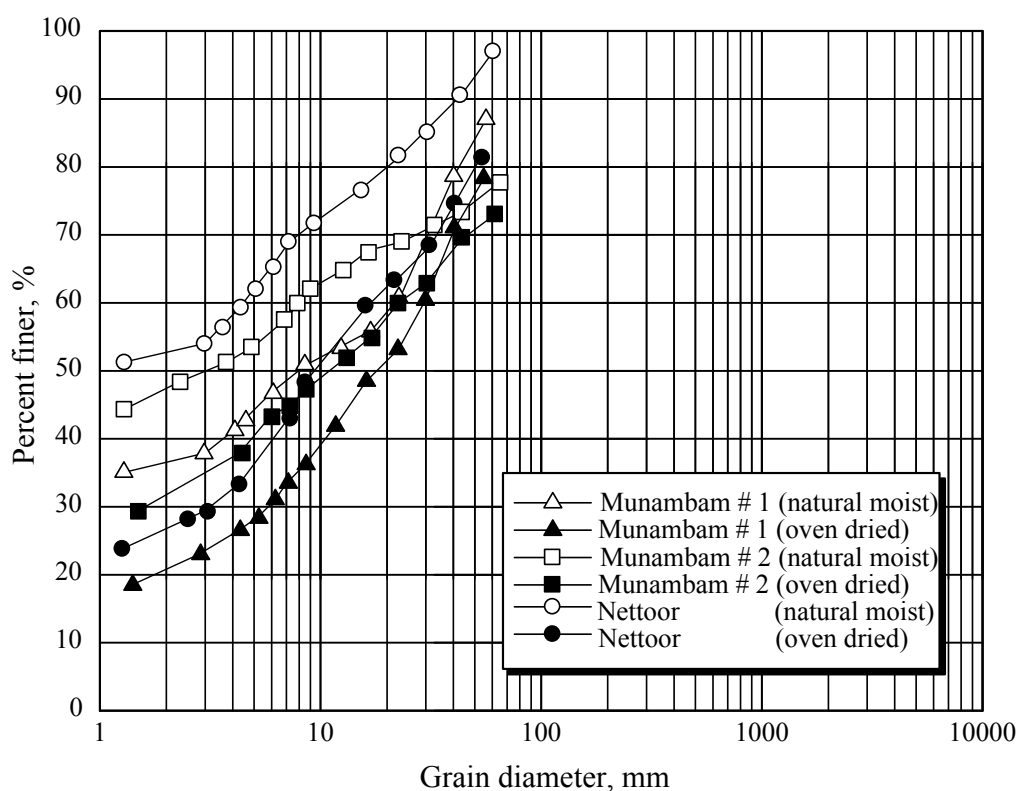
ตารางที่ 2.5 อิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างต่อค่าพิกัดเหลวดินเหนียวประจุชนิดเดียวอะริอะเคะ

(Egashira and Ohtsubo, 1981)

Type of soil	Liquid limit (%)		Percent reduction in liquid limit
	Field moisture	Air dried	
Na-Ariake clay			
-0.01 N NaCl	89	79	11.2
-1.0 N NaCl	166	107	35.5
Ca-Montmorillonite			
-Water	151	107	29.1
-1.00 N CaCl ₂	168	109	35.1

Jose et al. (1988b) รายงานผลการศึกษาอิทธิพลการเตรียมตัวอย่างต่อคุณสมบัติการกระจายขนาดของเม็ดดินของดินเหนียวสมุทรโคชิน (Cochin marine clay) ระหว่างการเตรียมดินตัวอย่าง โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นของดินในสนาม และดินที่ผ่านการอบก่อนการทดสอบ จากการศึกษาพบว่าดินที่ผ่านการอบก่อนการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 2.6 และระบุด้วยว่าการเตรียมดินตัวอย่างแบบแห้งโดยอากาศและแห้งโดยการอบ ยังทำให้ดินจับตัวเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น ลักษณะของเม็ดดินจะไม่กลับไปเหมือนสภาพเริ่มต้นของดินในสนามได้

Rao et al. (1989) รายงานผลการศึกษาการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบหาค่าพิกคูลของดินเหนียวสมุทรโคชิน จากการศึกษาพบว่าเมื่อความชื้นชั้นของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น จะทำให้อนุภาคดินรวมตัวกันด้วยแรงยึดเกาะสูง และอนุภาคดินที่มีขนาดเล็กแยกห่างกัน



รูปที่ 2.6 ผลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติการกระจายขนาดของเม็ดดินของดินเหนียวสมุทรโคชิน (Jose et al., 1988b)

จากงานวิจัยที่เสนอมมาแล้วข้างต้น (Egashira and Ohtsubo, 1981; Jose et al., 1988b; Rao et al., 1989) เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสมุทรจากการศึกษาพบว่าเมื่อเตรียมตัวอย่างแบบแห้งโดยการอบและแห้งโดยอากาศ จะทำให้พิกัดเหลวและเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ความชื้นสนามของดิน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อความเข้มข้นของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น จะทำให้อนุภาครวมตัวกันด้วยแรงยึดเกาะสูง และอนุภาคดินที่มีขนาดเล็กจะแยกห่างกัน แต่แนวทางการวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้นำมาใช้ศึกษากับดินเหนียวกรุงเทพซึ่งเป็นดินเหนียวสมุทรเช่นเดียวกัน ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงจะศึกษาอิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพ เปรียบเทียบกับดินคาโอไลไนท์ และดินเบนโทไนท์ โดยจะทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน และพิกัดอัตราส่วนการบีบอัดของดินทั้งสามประเภททั้งที่ผสมและไม่ผสมสารเคมี ตามวิธีของ Egashira and Ohtsubo (1981), Jose et al. (1988b), Rao et al. (1989) เพื่อให้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบดังกล่าวมาแล้ว การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ และแอกติวิตีตามวิธีของ Prakash and Sridharan (2004) และ Skempton (1953) เพิ่มเติมอีกด้วย

2.9 กลไกควบคุมพิกัดอัตราส่วนการบีบอัดและความสามารถในการยุบอัดตัว

การทดสอบดินส่วนมากจำแนกได้เป็นการทดสอบคุณสมบัติของดิน และการทดสอบพฤติกรรมของดินเมื่ออยู่ในสภาวะต่าง ๆ การหาพิกัดอัตราส่วนการบีบอัดเป็นตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของดินในสาขาของวิศวกรรมปฐพี วิธีการทดสอบได้จากประสบการณ์ ซึ่งอาจขัดแย้งกับพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์แต่การทดสอบทำได้ไม่ซับซ้อน และผลการทดสอบที่ได้ยังเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมโยธา

Olson and Mesri (1970) ระบุว่า Terzaghi (1929) ศึกษากลไกในการควบคุมคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียว และสรุปว่าดินเหนียวเป็นดินที่มีค่าอัตราส่วนโพรงที่ใหญ่ มีความสามารถในการยุบอัดตัวสูงเนื่องจากอิทธิพลขนาด และลักษณะรูปร่าง (Scale shaped) อนุภาคของแร่ดินเหนียว นอกจากนี้ Terzaghi, 1926; Terzaghi and Frohlich, 1936 ยังตั้งสมมุติฐานด้วยว่าดินเหนียวมีชั้น Semi-solid layer ของน้ำที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวเพื่อใช้อธิบายความสามารถในการซึมผ่านที่ต่ำของดินเหนียวและการอัดตัวขั้นที่สอง (Secondary consolidation)

Casagrande (1958) และ Norman (1958) รายงานว่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดพิกัดเหลวอยู่ในช่วง 15-30 กรัม/ชม.² จากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear) และไบมิดแรงเฉือน (Vane shear) ตามลำดับ

Sower et al. (1959) ระบุว่า การทดสอบพิกัดเหลวเป็นการวัดค่าความต้านทานการไหลหรือกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว

Sridharan and Rao (1973) ได้อธิบายว่าระหว่างอนุภาคดินเหนียวมีแรงของไฟฟ้าซึ่งอยู่ในธรรมชาติประกอบด้วยแรงดูดและแรงผลัก

Nagaraj et al. (1990) กล่าวว่าที่พิกัดเหลวของดินเหนียวทุกชนิดมีค่าแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน ประมาณ 5-6 กิโลปาสกาล และกำลังต้านทานแรงเฉือนประมาณ 1.7-2.0 กิโลปาสกาล

Kenney et al. (1967) ศึกษาอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติต่อกำลังต้านทานและการเสียวของดินเหนียวแคนาดา (Canadian clay) จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สรุปได้ว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของดินจะมีค่าตรงกันข้ามกับการเสียวของดิน กล่าวคือในกรณีที่ดินมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของดินมาก เมื่อน้ำหนักกดทับดินจะเสียวรูปน้อย

Leonards and Altschaeffl (1964) ได้ทำการศึกษาและพบว่า การยุบอัดตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับแรงของพันธะที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันทุกจุดสัมผัส และพันธะระหว่างอนุภาคดิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นประสิทธิผลจะเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคดิน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

Sridharan and Rao (1973, 1975) ได้ทำการศึกษาและพบว่า กลไกในการควบคุมความสามารถในการยุบอัดตัว และพิกัดเหลวของดินคาร์บอนีไท์ (บวมตัวต่ำ) และดินมอนท์มอริโลไนท์ (บวมตัวสูง) แตกต่างกัน กลไกที่ควบคุมความสามารถในการยุบอัดตัว และพิกัดเหลวของดินคาร์บอนีไท์คือความต้านทานแรงเฉือนที่ระดับอนุภาคของดิน ส่วนของดินมอนท์มอริโลไนท์คือความหนาของชั้นประจุกระจายตัว

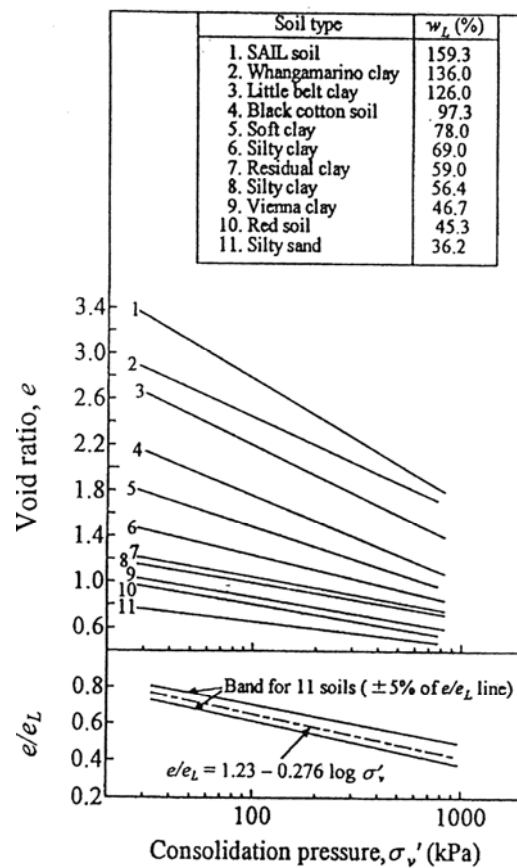
จะเห็นได้ว่า การศึกษากลไกที่ควบคุมความสามารถในการยุบอัดตัวของนักวิจัยในอดีต (Terzaghi, 1929; Terzaghi, 1926; Terzaghi and Frohlich, 1936) เป็นการพิจารณาเฉพาะอิทธิพลทางกายภาพของแร่ดินเหนียวเท่านั้น ในปัจจุบันพบว่าความสามารถในการยุบอัดตัวของดินเหนียวภายใต้น้ำหนักกดทับไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลหรือทางกายภาพของแร่ดินเหนียวเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วย (Bolt, 1956; Mitchell, 1973; Olson and Mesri, 1971; Sridharan and Rao, 1973) ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลทางกายภาพและทางเคมีฟิสิกส์ต่อพิกัดอัดเตอร์เบิร์ก และความสามารถในการยุบอัดตัว ความรู้ที่จะนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยจะใช้ความรู้ที่นำเสนอโดย Sridharan and Rao (1973, 1975) ภายใต้การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และพิกัดอัดเตอร์เบิร์กของดินคาร์บอนีไท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพประจวบวชนิดเดียวทั้งหมด จากผลทดสอบ

2.10 เส้นสถานะเนื้อแท้ (Intrinsic State Line, ISL)

Nagaraj et al. (1998) ทำการวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ (Remoulded clays) และพบว่าอัตราส่วนโพรง (Void ratio) เป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินเหนียวปั้นใหม่ โดยที่ความชันขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของดินดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์นี้สามารถที่จะทำให้เป็นความสัมพันธ์ทั่วไปได้ โดยอาศัยอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{e}{e_L} = 1.23 - 0.276 \log \sigma'_v \quad (2.3)$$

เมื่อ e คือ อัตราส่วนโพรง e_L คือ อัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว และ σ'_v คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง นอกจากนี้ ยังระบุอีกว่าการที่อัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวสามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ทั่วไปได้ เนื่องจากพิกัดเหลวเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดินชนิดหนึ่ง ๆ และสามารถสะท้อนผลเนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีที่มีอยู่ในดิน



รูปที่ 2.7 เส้นการอัดตัวของดินประเภทต่าง ๆ และเส้นสถานะเนื้อแท้ (Nagaraj et al., 1998)

Burland (1990) ศึกษาลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว และได้นำเสนอสมการทั่วไป เพื่อใช้ทำนายกราฟการอัดตัวของดินเหนียวไว้พันธะเชื่อมประสาน แสดงดังสมการที่ 2.4

$$I_v = 2.45 - 1.285 \log \sigma'_v + 0.015 \log \sigma_v'^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ I_v คือ ดัชนีของอัตราส่วนโพรง ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.5

$$I_v = \frac{e - e_{100}}{e_{100} - e_{1000}} \quad (2.5)$$

โดย e_{100} คือ อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 100 kPa.

e_{1000} คือ อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 1000 kPa.

นอกจากนี้ยังระบุด้วยว่าค่า e_{100} และ $(e_{100} - e_{1000})$ สามารถประมาณค่าได้โดยสร้าง ความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

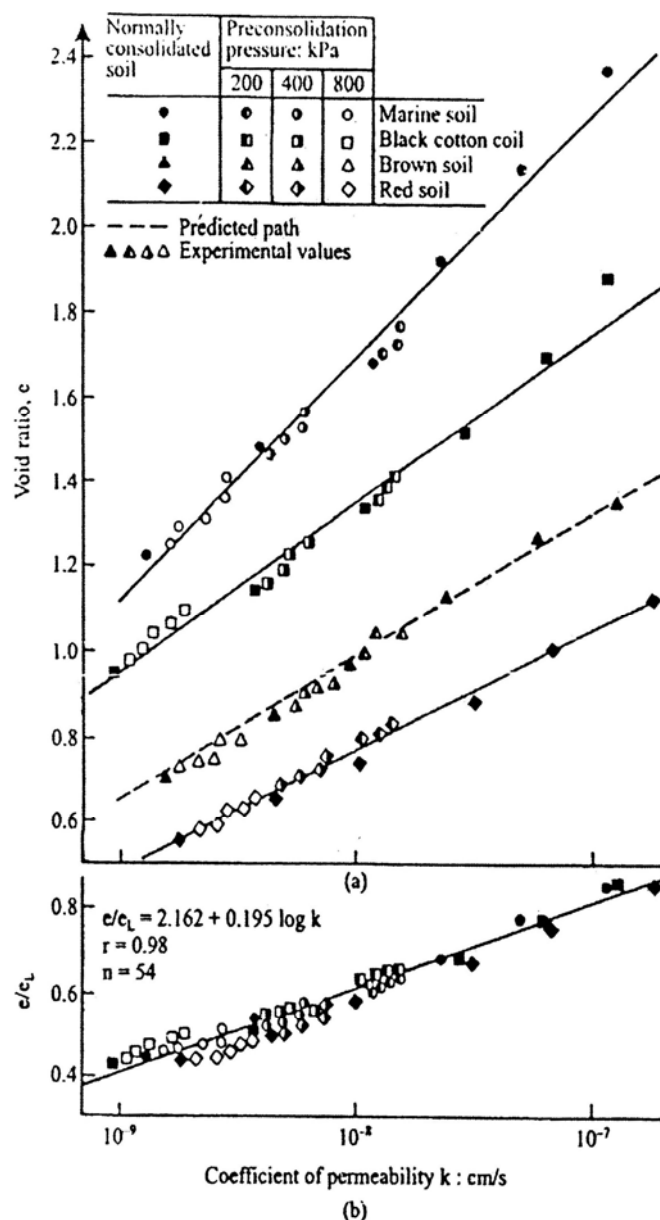
$$e_{100} = 0.190 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3 \quad (2.6)$$

$$e_{100} - e_{1000} = 0.256e_L - 0.04 \quad (2.7)$$

2.11 การซึมผ่านได้ของน้ำ

ดังได้แสดงข้างต้นแล้วว่าเส้นสถานะเนื้อแท้เป็นเส้นที่อธิบายพฤติกรรมทางวิศวกรรมของ ดินได้ดี เนื่องจาก e/e_L เป็นตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับแฟบริกของดิน ดังนั้น Nagaraj et al. (1998) ได้ใช้ตัวแปรดังกล่าวในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับ อัตราส่วนโพรง แสดงดังรูปที่ 2.8 และสมการความสัมพันธ์ทั่วไป (Normalization) ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{e}{e_L} = 2.162 + 0.195 \log k \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.8 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่าง ๆ
 (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Nagaraj et al., 1998)

ถึงแม้ว่าสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ และสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ที่มีผู้เสนอมาแล้วข้างต้น (Burland, 1990; Nagaraj et al., 1998) จะสร้างจากผลทดสอบการอัดตัว คายน้ำของดินหลายชนิด แต่ยังไม่มีการยืนยันว่าสามารถนำมาใช้กับดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้ ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จะสร้างสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่เหมาะสม สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ขึ้นมาใหม่ ตามวิธีของ Burland (1990) และ Nagaraj et al. (1998) โดยใช้

ข้อมูลจากผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียวของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ อย่างไรก็ตามถ้าความสัมพันธ์ของชุดข้อมูล ($|r|$) ที่ได้ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเทียบปรับสมการดังกล่าวขึ้นมาใหม่

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษานี้มุ่งเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ กับพิกัดอัตราเบิร์กของดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อเปลี่ยนแปลงความแรงและความเข้มข้นของประจุบวกของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพฯ ประกอบด้วยประจุบวกหลายชนิด ยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคของดินเหนียว (เชิดชนินทร์ หมดมลทิน และคณะ, 2547) แต่การศึกษานี้จะเลือกศึกษาเฉพาะอิทธิพลของ Na^+ และ Ca^{2+} ต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ และคุณสมบัติพื้นฐานของดินเท่านั้น เพราะว่าสารประกอบที่ใช้เตรียมดินประจุบวกชนิดเดียวหาได้ง่ายและราคาถูก

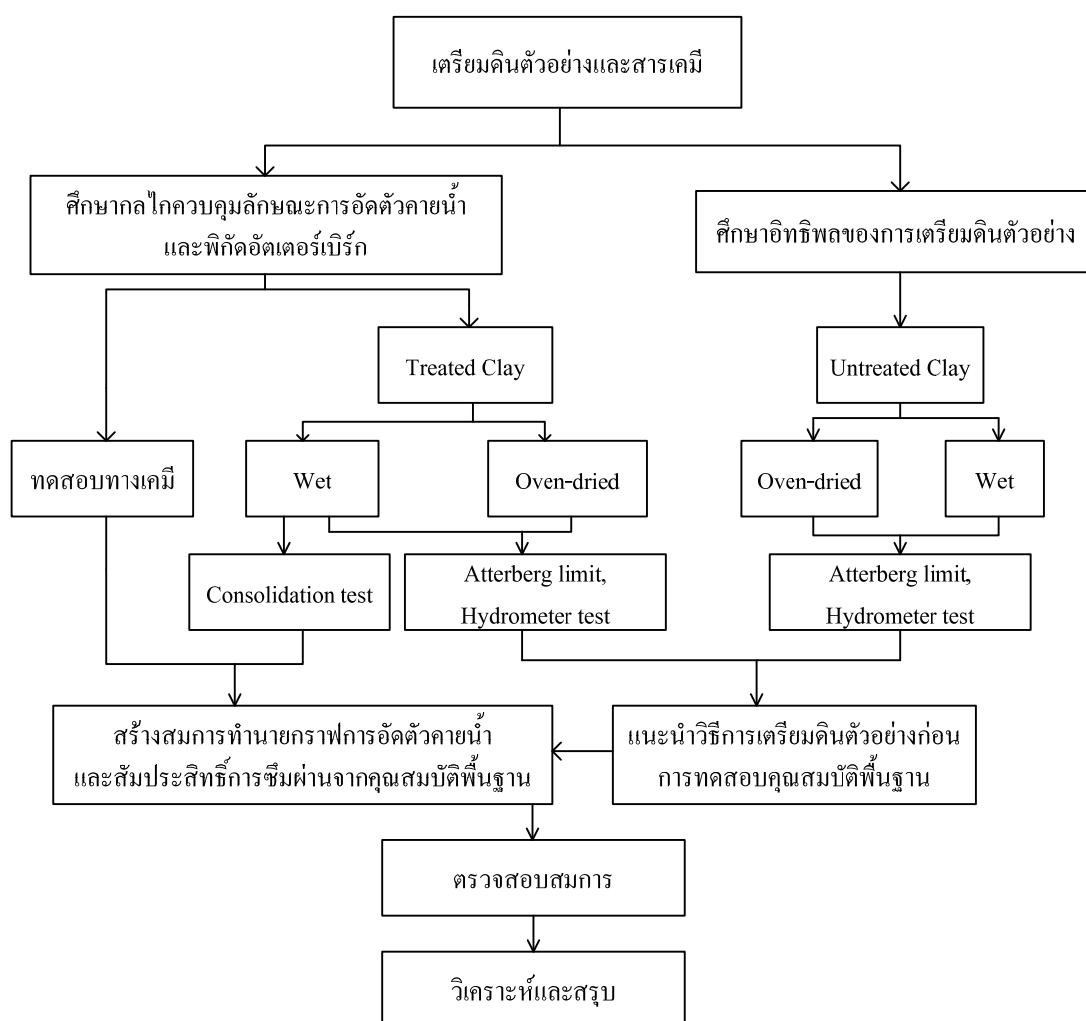
จากการศึกษาทั่วโลกที่ควบคุมความสามารถในการยุบตัวของนักวิจัยในอดีต (Terzaghi, 1929; Terzaghi, 1926; Terzaghi and Frohlich, 1936) เป็นการพิจารณาเฉพาะอิทธิพลทางกายภาพของแรงดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ปัจจุบันพบว่าความสามารถในการยุบตัวของดินเหนียวภายใต้ น้ำหนักกดทับ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลหรือทางกายภาพของแรงดินเหนียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วย (Bolt, 1956; Mitchell, 1973; Olson and Mesri, 1971; Sridharan and Rao, 1973) ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จะศึกษาอิทธิพลทางกายภาพและทางเคมีฟิสิกส์ต่อพิกัดอัตราเบิร์ก และความสามารถในการยุบตัว โดยจะทำการทดสอบพิกัดอัตราเบิร์ก และการอัดตัวคายน้ำของดินคาโอไลน์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ ประจุบวกชนิดเดียวทั้งหมด จากผลทดสอบดังกล่าว ถ้าพบว่าแนวโน้มของพิกัดอัตราเบิร์ก และคุณสมบัติการการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ ประจุบวกชนิดเดียว คล้ายกับดินคาโอไลน์หรือดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว ก็จะสรุปได้ว่ากลไกที่ควบคุมพิกัดอัตราเบิร์ก และคุณสมบัติการยุบตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ ระหว่างความต้านทานแรงเฉือนหรือความหนาของชั้นประจุกระจายตัว อีกทั้งสามารถบ่งบอกได้ว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ เป็นดินที่มีพฤติกรรมการบวมตัวสูงหรือต่ำ ถึงแม้ว่าสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ และสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีผู้นำเสนอมาแล้ว (Burland, 1990; Nagaraj et al., 1998) โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำกับพิกัดอัตราเบิร์ก แต่ยังไม่มีการยืนยันว่าสามารถนำมาใช้กับดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้ ดังนั้นการศึกษานี้จะสร้างสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้

และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากพิกัดเหลวที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯขึ้นมาใหม่ ตามวิธีของ Burland (1990) และ Nagaraj et al. (1998) โดยใช้ผลการทดสอบการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวประจวบฯชนิดเดียวของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ ถ้าความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่ได้ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเทียบปรับสมการดังกล่าวขึ้นมาใหม่

เนื่องจากการเตรียมดินตัวอย่างมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสมุทร (Egashira and Ohtsubo, 1981; Jose et al., 1988b; Rao et al., 1989) ดังนั้นจึงต้องศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน พิกัดอัตราเบร็ก และแอกติวิตี โดยจะทำการทดสอบดินทั้งที่ผสมและไม่ผสมสารเคมี เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติดังกล่าวอย่างชัดเจน การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะแปรผันความแรง และความเข้มข้นของประจุบวก (Na^+ และ Ca^{2+}) ของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

เพื่อให้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ผลทดสอบทางวิศวกรรมของดินมากยิ่งขึ้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และการวิเคราะห์ความจุแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้

โดยแนวทางการศึกษาวิจัยเป็นแบ่ง 2 ส่วนคือ หนึ่ง ศึกษากลไกควบคุมการอัดตัวคายน้ำและพิกัดอัตราเบร็กของดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุบวกและชนิดประจุ จาก Na^+ เป็น Ca^{2+} ของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯจากคุณสมบัติพื้นฐานของดิน (พิกัดเหลว) ตามวิธีของ Burland (1990), Nagaraj et al. (1998) ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่าง ระหว่างการเตรียมตัวอย่างแบบเปียก และแบบแห้งต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ เพื่อแนะนำวิธีการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม แผนงานวิจัยทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดแต่ละขั้นตอนการทดสอบดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

ศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่าง	
1. Liquid Limit, Plastic Limit and Hydrometer Test (ดิน 3 ชนิด × 2 ประเภท × 3 การทดลอง)	18 ตัวอย่าง
ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำและพิกัดอัตราเบร็ก	
1. Consolidation Test 1.1 Treated Clay (ดิน 3 ชนิด × 2 สาร × 2 ความเข้มข้น)	12 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง (ต่อ)

ศึกษากลไกควบคุมลักษณะการอัดตัวคายน้ำและฟลักซ์แอมโมเนียมไนโตรเจน	
2. Liquid Limit and Plastic Limit Test	
2.1 Untreated Clay (ดิน 3 ชนิด × 2 การทดลอง)	6 ตัวอย่าง
2.2 Treated Clay (ดิน 3 ชนิด × 2 สาร × 2 ความเข้มข้น × 2 การทดลอง)	24 ตัวอย่าง
3. การทดสอบทางเคมี	
3.1 การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของดิน	30 ตัวอย่าง
3.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (ดิน 3 ชนิด × 3 ประเภท)	9 ตัวอย่าง
3.3 การวิเคราะห์ความจุแอมโมเนียมไนโตรเจนที่แลกเปลี่ยนได้ (ดิน 3 ชนิด × 3 ประเภท)	9 ตัวอย่าง

3.2 เตรียมดินตัวอย่างและสารเคมี

ดินเหนียวกรุงเทพมหานครเก็บแบบแปรสภาพจากบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ความลึกประมาณ 2-3 เมตรจากผิวดิน ดินเบนโทไนท์ และคาโอไลน์ที่ใช้ดินเกรดการค้า การเตรียมตัวอย่างแบบเปียกจะใช้ดินทั้งที่ผสมและไม่ผสมสารเคมีมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้เลย ส่วนการเตรียมตัวอย่างแบบแห้งจะอบตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ASTM D421-85, D 4318) ก่อนทดสอบ

เนื่องจากในดินเหนียวประกอบไปด้วยประจุบวก และประจุลบหลายชนิดยึดเกาะอยู่กับ ดินเหนียว การทำให้ดินมีประจุบวกชนิดเดียวจะทำการล้างดินด้วยสารละลายคลอไรด์เข้มข้น จากนั้นทำการล้างคลอไรด์ออกด้วยน้ำกลั่น การศึกษานี้จึงทำให้ตัวอย่างดินเป็นดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียว โดยดินเหนียวโซเดียมคือดินที่ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และดินเหนียวแคลเซียม คือดินที่ผสมเข้ากับแคลเซียมคลอไรด์ และทำการแยกดินกับน้ำด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge machine) เป็นจำนวน 3 ครั้ง และล้างออกด้วยน้ำกลั่นอย่างน้อย 7 รอบ จากนั้นทำการทดสอบว่าไม่มีคลอไรด์ (Cl) ตกค้างอยู่โดยเติมซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) อย่างไรก็ดี ตาม เนื่องจากขั้นตอนการทำดินเหนียวให้เป็นประจุบวกชนิดเดียวค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะผสมสารเคมีที่ความเข้มข้นต่าง พร้อมกับทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานเพราะว่าสามารถทดสอบได้เร็ว เมื่อพบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่เด่นชัดแล้วจึงจะเลือกใช้ความเข้มข้นนั้น โดยเลือกใช้ความเข้มข้นสองความเข้มข้นต่อหนึ่งสารเคมี

Hingston (1972) ระบุว่าเมื่ออิออนในสารละลายไม่เหมือนกับอิออนที่ผิวอะตอมโลหะของแร่ดินเหนียว ผิวของดินเหนียวจะดูดซับ H^+ หรือ OH^- จากสารละลาย ถ้า H^+ ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินจะประกอบด้วยประจุบวก เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลทางไฟฟ้าใหม่ดินจึงดูดซับประจุลบจากสารละลายอีกครั้ง ณ จุดที่ pH ของ H^+ เท่ากับ OH^- ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า จุดนี้เรียกว่า “Zero point of charge” หรือ ZPC นอกจากนี้ยังระบุด้วยว่า pH ณ จุด ZPC ยังขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวด้วย ดังนั้นความหนาของชั้นประจุกระจายตัวซึ่งเป็นแรงผลักดันแนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นทางด้านความเป็นกรดและเบสของ ZPC ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาแล้วคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดินเหนียว นอกจากขึ้นอยู่กับความแรงและความเข้มข้นของประจุบวกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ pH ของดินด้วย ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงต้องปรับค่า pH ของดินเหนียวประจุบวกชนิดเดียวให้อยู่ในช่วงค่าที่เป็นกลาง (pH ประมาณ 6-9)

การทำดินเหนียวประจุชนิดเดียว (Homoionic Test) การเตรียมดินเหนียวประจุชนิดเดียวทำตามวิธีของ Dash & Stotzky (1982) และ Hartter & Stocky (1975) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge machine) พร้อมขวดบรรจุตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 2) ดินคาโอลิไนต์ ดินเบ็นโทไนต์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ แสดงดังรูปที่ 3.3
- 3) สารเคมีโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์
- 4) เครื่องปั่นผสมดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 5) เครื่องชั่ง (ละเอียดถึง 0.01 และ 0.0001 g)
- 6) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1000 และ 2000 ml
- 7) มีดปาดดิน (Spatula)
- 8) น้ำกลั่น
- 9) ช้อนตักสารเคมี
- 10) ถุงมือป้องกันสารเคมี

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1) เตรียมดินสำหรับทดสอบโดยหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินตัวอย่างก่อนการทำดินเหนียวประจุชนิดเดียว
- 2) ชั่งดินที่ได้จากข้อ 1) หนัก 1,000 กรัม (น้ำหนักดินแห้ง) ด้วยเครื่องชั่งที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.01 g
- 3) ชั่งสารเคมีโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์โดยเทียบกับน้ำหนักดินแห้งตามน้ำหนักที่ต้องการ ด้วยเครื่องชั่งที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.0001 g

- 4) ผสมดินกับสารเคมีจากข้อ 1) และ 2) และน้ำกลั่น 1,000 ml และทำการปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ดินและสารละลายทำปฏิกิริยาสมบูรณ์
- 5) นำดินที่ผสมแล้วใส่ขวดบรรจุตัวอย่าง เพื่อเหวี่ยงแยกตะกอนระหว่างน้ำและดินที่ความเร็วรอบ 7,000 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาประมาณ 20–25 นาที
- 6) ทำซ้ำข้อ 3)–5) จนครบ 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งนำตัวอย่างดินที่ได้เทน้ำที่แยกชั้นออกจากดินตัวอย่าง แล้วเอาดินตัวอย่างออกจากขวดบรรจุตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์
- 7) ใส่เฉพาะน้ำกลั่น 1,000 ml ลงในตัวอย่างดินแล้วผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องปั่นผสมเป็นเวลา 30 นาที โดยไม่ต้องใส่สารเคมีเพื่อทำการล้างคลอไรด์ที่ตกค้างอยู่ ด้วยการเหวี่ยงแยกตะกอนโดยใช้เวลาประมาณ 15–20 นาที
- 8) ทำตามข้อ 7) อย่างน้อย 7 รอบ แต่ละรอบต้องเอาดินตัวอย่างออกใส่บีกเกอร์ด้วย และทำการทดสอบว่าไม่มีคลอไรด์ตกค้างอยู่โดยทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไนเตรด



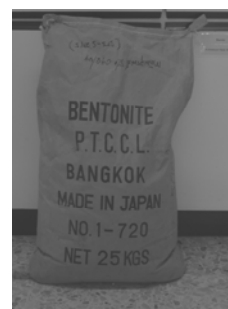
ก) เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน

ข) ขวดบรรจุตัวอย่าง

รูปที่ 3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge machine)



ก) ดินเหนียวกรุงเทพ



ข) ดินเบนโทไนท์



ค) ดินคาโอไลน์

รูปที่ 3.3 ดินที่ใช้ศึกษาวิจัย



รูปที่ 3.4 เครื่องปั้นผสม

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

คุณสมบัติพื้นฐานของดินเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินตามมาตรฐาน ASTM และ BS การทดสอบทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2216
- 2) พิกัดเหลว ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1377
- 3) พิกัดพลาสติก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318
- 4) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-63

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว (Rapid consolidation test) ตามวิธีของ Horpibulsuk et al. (2007) การทดสอบทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็วทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi (1923) ร่วมกับหลักการ Hyperbola method ของ Sridharan et al. (1985) ในการประมาณหาระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยของดิน (Average degree of consolidation, U) ที่เวลาใด ๆ หลังจากวางน้ำหนัก หลังจากนั้นก็สามารถประมาณความเค้นประสิทธิผลได้ เมื่อทราบค่าความเค้นประสิทธิผลแล้วก็ทำการวางน้ำหนักค่าต่อไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

- 1) เตรียมดินเหนียวตัวอย่าง สำหรับทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบรวดเร็ว
- 2) โหลด (Load) ดินตัวอย่างด้วยความดัน 10 กิโลปาสกาล
- 3) บันทึกการทรุดตัวทุก ๆ 2 นาที เป็นเวลาประมาณ 60 นาที
- 4) กำหนดระดับการอัดตัวคายน้ำเฉลี่ยโดยวิธีของ Sridharan and Prakash (1985)
- 5) กำหนดความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งตามทฤษฎีของ Terzaghi (1923)
- 6) เพิ่มความดันเป็น 20 กิโลปาสกาล และทำตามขั้นตอนเช่นเดียวกับข้อ 3)–5)
- 7) วาดกราฟ e และ $\log \sigma_v'$
- 8) หาค่าดัชนีการอัดตัว, สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ, สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

เพื่อให้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และการวิเคราะห์ความจุแอกไออนที่แลกเปลี่ยนได้ โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

3.5.1 การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของดิน

ทดสอบตามการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน พืช และปฏิกิริยา ของสายงานวิเคราะห์วิจัยเพื่อพัฒนาเกษตรกรรม กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2535) การวิเคราะห์ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

3.5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

การทดสอบเพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ใช้วิธีทดสอบ Methylene blue adsorption สารเคมีที่ใช้ได้แก่ น้ำกลั่นหรือ deionized water สำหรับผสมกับดินในการ Titrate, สารละลายกรดความเข้มข้น 1-2 normal เตรียมโดยการละลาย HCl หรือ H_2SO_4 ลงใน deionized water จนมีความเข้มข้น 1-2 normal และ Methylene blue solution ความเข้มข้น 0.01 normal เตรียมโดยการละลาย Methylene blue chloride ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$) 1.87 gm ลงใน deionized water 500 cc

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) เตรียมดินสำหรับทดสอบโดยการอบที่อุณหภูมิ $70-80^{\circ}C$ แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 120
- 2) ชั่งดินที่ได้จากข้อ 1) ด้วยเครื่องชั่งที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.001 g ดังนี้ ดินเหนียวกรุงเทพ 2 กรัม, ดินคาโอไลไนท์ 5 กรัม, ดินเบนโทไนท์ 0.5 กรัม
- 3) ผสมดินจากข้อ 2) กับ deionized water 300 cc โดยเครื่องปั่นผสมตามระยะเวลาปั่นผสม ดังนี้ ดินเหนียวกรุงเทพ 10 นาที, ดินคาโอไลไนท์ 5 นาที, ดินเบนโทไนท์ 15 นาที เทน้ำดินลงใน Beaker 600 cc น้ำดินที่เหลือติดเครื่องปั่นผสมให้ใช้กระบอกฉีดน้ำที่บรรจุ deionized water ฉีดลงมาจนหมด
- 4) ปรับ pH น้ำดินจาก ข้อ 3) ให้มีค่าระหว่าง 3-4 ด้วยสารละลายกรดที่เตรียมไว้
- 5) หยดสารละลาย Methylene blue ความเข้มข้น 0.01 N จากปิเปต ที่เตรียมให้ครั้งละ 1 ml กวนให้เข้าเนื้อกันอย่างน้อย 1-2 นาที ก่อนหยดสารละลายครั้งต่อไป
- 6) ใช้แท่งแก้วแตะสารละลายมาหยดลงบนกระดาษกรอง 1 หยด ทุก ๆ ครั้งที่เติมสารละลาย Methylene blue ลงไป 1 cc ช่วงแรก ๆ ขณะยังไม่ถึง End point สีของ Methylene blue จะยังไม่ซึมเข้าไปในกระดาษกรอง จนกระทั่งถึงจุด End point, Methylene blue ส่วนเกินที่ไม่ถูกดินดูดซับจะซึมมาติดเนื้อกระดาษกรองเป็นสีฟ้าอมเขียว

- 7) เพื่อให้มั่นใจว่าถึงจุด End point จริง ให้กวนผสมน้ำดินต่อไปอีก 2 นาที แล้วหยดน้ำดินลงบนกระดาษกรองอีกครั้ง

พื้นที่ผิวจำเพาะของดิน 1 กรัม สามารถคำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Hang and Brindley (1970) ดังสมการที่ 3.1

$$S = M \times A \times 6.02 \times 0.01 \quad (3.1)$$

เมื่อ S คือ Specific surface area (m^2/g)

M คือ Methylene blue index (MBI)

A คือ พื้นที่ผิวของ Methylene blue cation ซึ่งมีค่าเท่ากับ 129.2 square angstroms

3.5.3 การวิเคราะห์ความจุแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Cation Exchange Capacity, CEC)

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ชั่งดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm.หนัก 5.00 g ใส่ในกระดาษกรองที่พับวางไว้ในกรวยกรองซึ่งวางอยู่บนขวดชมพู 250 ml
- 2) ล้างดิน (Leach) ด้วย NH_4OAc เข้มข้น 1.0 M, pH 7.0 ครั้งละ 25 ml 4 ครั้ง การล้างดินแต่ละครั้งต้องรอให้ NH_4OAc ผ่านกระดาษกรองลงไปที่หมดเสียก่อนแล้วจึงล้างครั้งต่อไป
- 3) ล้างดินในกระดาษกรองต่อด้วย NH_4Cl เข้มข้น 0.25 M ครั้งละ 25 ml 2 ครั้ง
- 4) ล้างดินด้วย $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เข้มข้น 40% ครั้งละ 25 ml อีก 4 ครั้งเพื่อไล่ Free NH_4^+
- 5) ล้างดินด้วย NaCl เข้มข้น 10% ครั้งละ 25 ml 4 ครั้ง โดยใช้ขวดปริมาตร 100 ml รองรับและปรับปริมาตรด้วย NaCl เข้มข้น 10%
- 6) นำไปกลั่นด้วยชุดกลั่นโดยปิเปต มา 20 ml และเติม NaOH เข้มข้น 32% จำนวน 5 ml เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และรองรับสิ่งกลั่นด้วย H_3BO_3 เข้มข้น 4% จำนวน 5 ml โดยหยด Mixed indicator 3-4 หยด สารละลาย H_3BO_3 จะมีสีเขียวทำการกลั่นประมาณ 5 นาที จนได้สิ่งกลั่นประมาณ 20 ml
- 7) นำสิ่งกลั่นไป Titrate กับกรด H_2SO_4 เข้มข้น 0.12 M จนถึง End point ซึ่งสีเขียวของสารละลาย Boric จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู
- 8) บันทึกปริมาตรของกรด H_2SO_4 ที่ใช้เพื่อนำมาใช้คำนวณต่อไป
- 9) ทำการกลั่น Reagent blank ควบคู่ไปด้วยทุกครั้งที่ทำกรวิเคราะห์

3.6 การเทียบปรับสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

การเทียบปรับสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ จะใช้ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ (บวมตัวสูง และบวมตัวต่ำ) เฉพาะที่ผสมสารเคมีเท่านั้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.6.1 การเทียบปรับสมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้

มีแนวทางการศึกษา 2 แนวทาง

- 1) ใช้แนวคิดแบบเดียวกับ Nagaraj et al. (1998) ที่เสนอว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง และลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งของดินเหนียวปั้นใหม่ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของดิน นอกจากนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถที่จะทำให้เป็นความสัมพันธ์ทั่วไปได้ โดยอาศัยอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ดังนั้นถ้าพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L และ $\log \sigma'_v$ ของดินทั้งหมดแล้วได้ความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง จะได้สมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ของดินเหนียวกรุงเทพฯเป็นไปตามสมการที่ 3.2

$$\frac{e}{e_L} = a - b \log \sigma'_v \quad (3.2)$$

- 2) ใช้แนวคิดแบบเดียวกับ Burland (1990) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง I_v กับ σ'_v , e_{100} กับ e_L และ $(e_{100} - e_{1000})$ กับ e_L ของดินทั้งหมด ถ้าได้ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จะได้สมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ตามสมการที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$I_v = c - d \log \sigma'_v + e \log \sigma_v'^3 \quad (3.3)$$

$$e_{100} = f + g - h e_L^2 + i e_L^3 \quad (3.4)$$

$$e_{100} - e_{1000} = j e_L - k \quad (3.5)$$

3.6.2 การเทียบปรับสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ใช้แนวคิดเดียวกับ Nagaraj et al. (1998) ที่ระบุว่าดินต่างชนิดกันซึ่งมีค่า e/e_L เท่ากัน จะมีลักษณะของแฟบริกที่คล้ายคลึงกัน จึงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L และ $\log k$ ของดินทั้งหมดแล้ว ได้ความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง จะได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสำหรับดินเหนียวกรุงเทพ เป็นไปตามสมการที่ 3.6

$$\frac{e}{e_L} = l + m \log k \quad (3.6)$$

อย่างไรก็ตาม การเทียบปรับสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านข้างต้น ถ้าได้ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลไม่เป็นไปตามหลักการหรือแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต การวิจัยครั้งนี้จะนำเสนอสมการเทียบปรับดังกล่าวขึ้นมาใหม่ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้กับดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวต่ำ และบวมตัวสูงต่อไป

3.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ความถูกต้องของแบบจำลองการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่เสนอตามหัวข้อ 3.6 จะเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดของ Burland (1990) ของดินเหนียวที่มีค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่ต่างกัน และสมการความสัมพันธ์ทั่วไปของ Nagaraj (1998) ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติการอัดตัวและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง (Low and high swelling clays) ที่มีความเข้มข้นและชนิดของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่างกัน รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ ทำย่นนำเสนอสมการความสัมพันธ์ทั่วไปเพื่อใช้ทำนายเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง

4.2 คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติพื้นฐาน และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติพื้นฐาน และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระของ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพแสดงดังตารางที่ 4.1 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

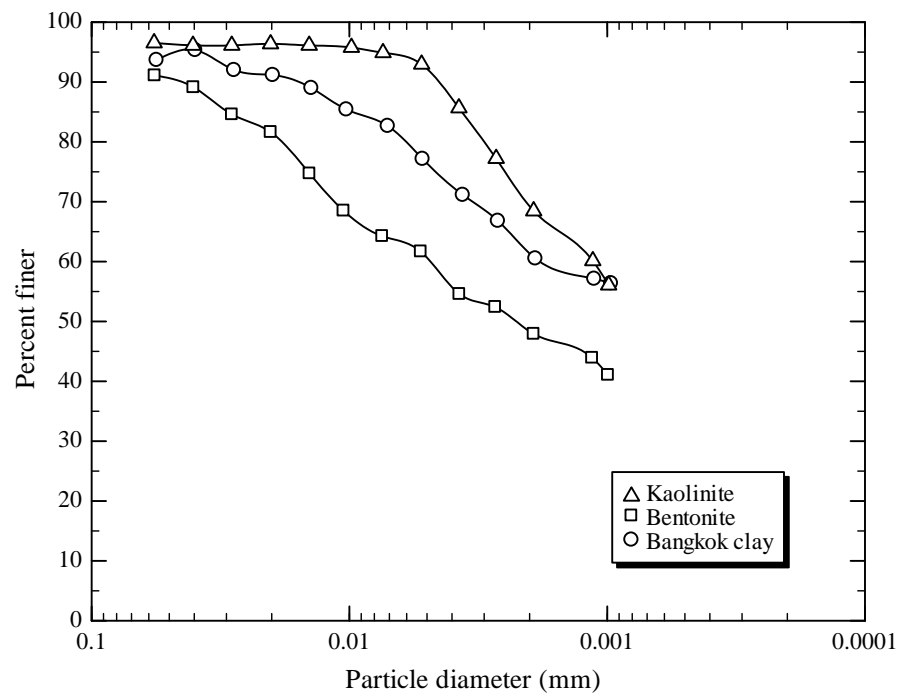
ดินเบนโทไนท์ มีอัตราส่วน ทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 0 : 52 : 48, ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.63, ค่าพิกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกเท่ากับ 211.4, 35.8 และ 175.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity) เท่ากับ 55.2 meq/100gm พื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 155.5 m²/g ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 9.27 และค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระเท่ากับ 3.88 ซึ่งจัดเป็นดินที่มีการบวมตัวสูง ตามการจำแนกดินที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004)

ดินคาโอลิไนท์ มีอัตราส่วน ทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 0 : 31 : 69, ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65, ค่าพิกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกเท่ากับ 46.4, 24.2 และ 22.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกต่ำ (CL) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 7.2 meq/100gm พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 23.24 m²/g ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.59 และค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระเท่ากับ 0.70 ซึ่งจัดเป็นดินที่ไม่มีการบวมตัว

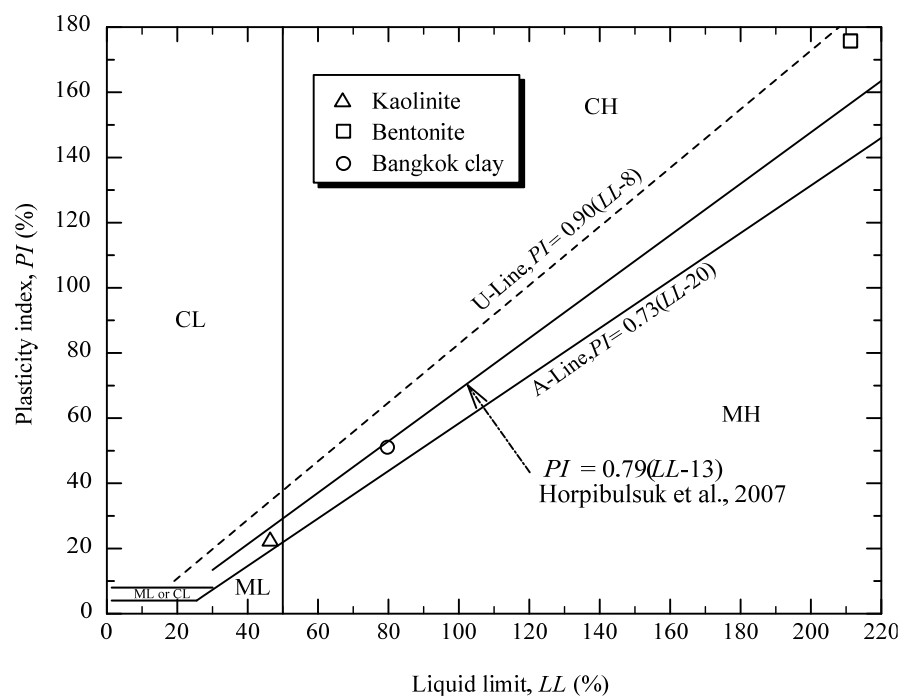
ดินเหนียวกรุงเทพฯ มีอัตราส่วน ทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 0 : 39 : 61, ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66, ค่าพิกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกเท่ากับ 79.86, 28.97 และ 50.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 10.8 meq/100gm พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 63.28 m²/g และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.66 ค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.24 ลักษณะการบวมตัวของดินค่อนข้างต่ำสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hopibulsuk et al. (2007)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ

คุณสมบัติ	ดินคาโอลิไนท์	ดินเบนโทไนท์	ดินเหนียวกรุงเทพฯ
ความถ่วงจำเพาะ (G _s)	2.65	2.63	2.66
พิกัดเหลว (%)	46.4	211.4	79.9
พิกัดพลาสติก (%)	24.2	35.8	29.0
ดัชนีสภาพพลาสติก (%)	22.2	175.6	50.9
FSR	0.70	3.88	1.24
ทราย (%)	0	0	0
ดินตะกอน (%)	31	52	39
ดินเหนียว (%)	69	48	61
Cation exchange capacity (meq/100gm)	8.30	85.20	23.60
pH	6.59	9.27	6.66
Specific surface (m ² /g)	23.09	155.56	83.28



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ

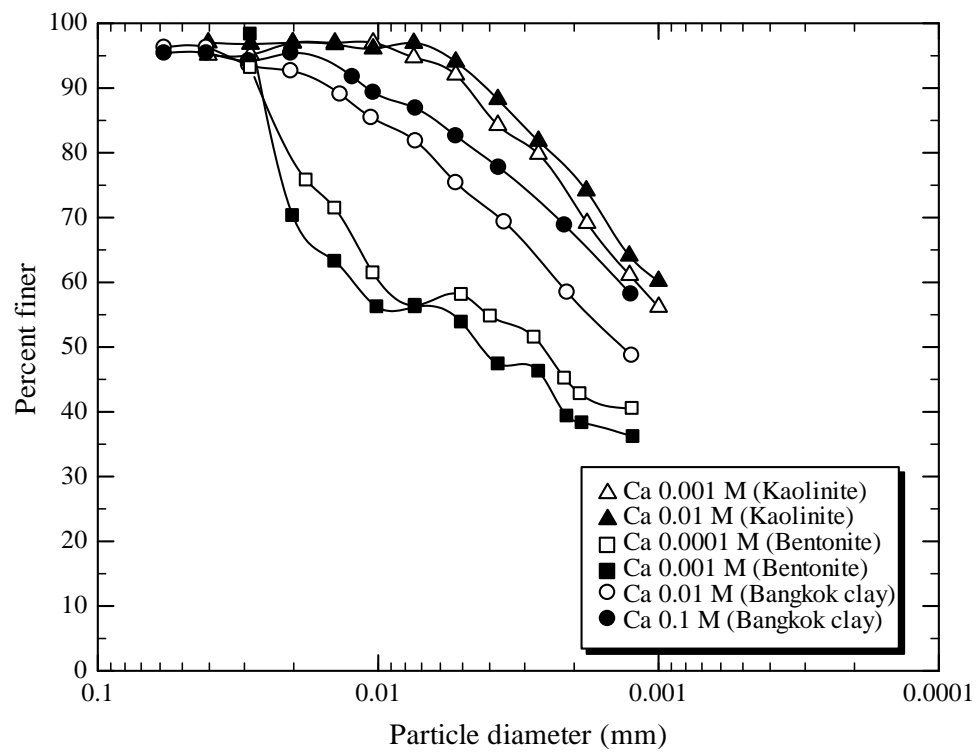
4.3 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อคุณสมบัติ

พื้นฐาน

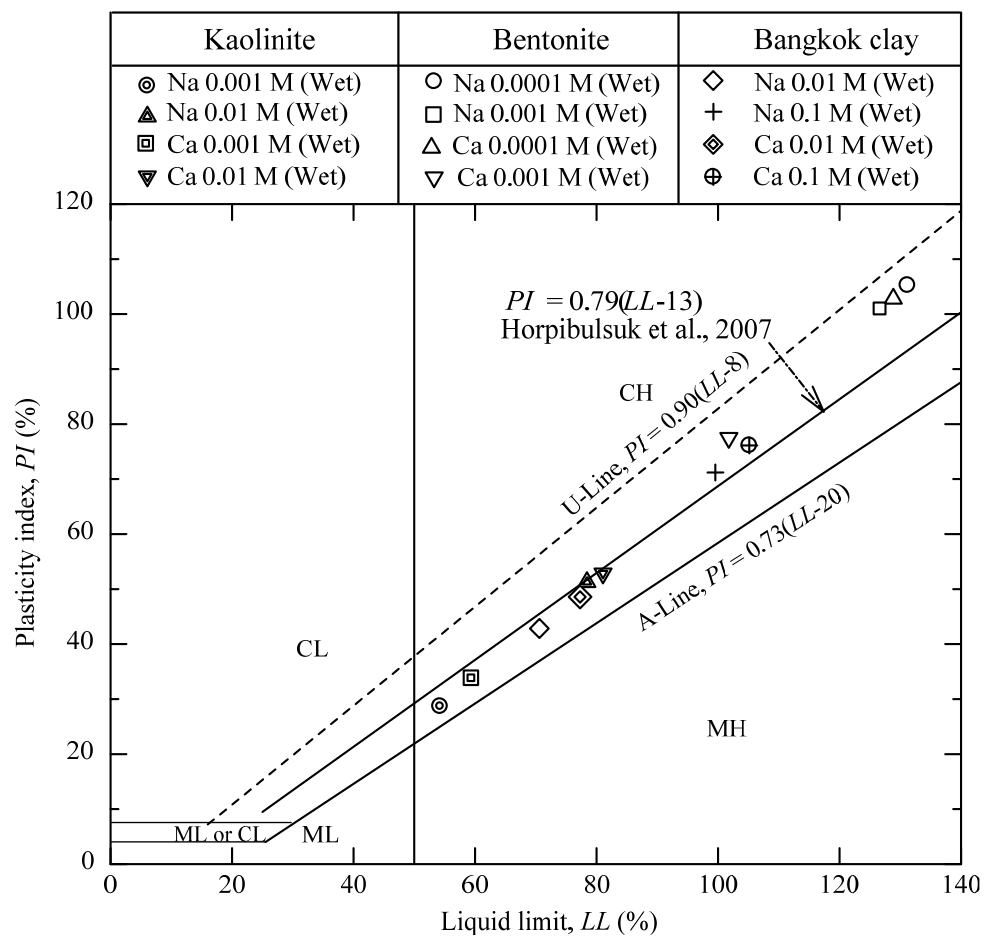
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ จะเห็นว่าพิกัดเหลวของดินโซเดียมคาโอลิไนท์ (Na-Kaolinite) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของประจุบวกเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจาก 54.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 0.001M เป็น 78.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 0.01 M ในทำนองเดียวกัน สำหรับดินแคลเซียมคาโอลิไนท์ (Ca-Kaolinite) พิกัดเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของประจุบวก โดยเพิ่มจาก 59.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 0.001M เป็น 81.1 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 0.01M นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนชนิดของประจุบวก จาก Na^+ เป็น Ca^{2+} กล่าวคือจากดินโซเดียมคาโอลิไนท์เป็นดินแคลเซียมคาโอลิไนท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากัน พิกัดเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจาก 54.2 เปอร์เซ็นต์ เป็น 59.4 เปอร์เซ็นต์ และ 78.4 เปอร์เซ็นต์ เป็น 81.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนจาก Na-Kaolinite 0.001 M เป็น Ca-Kaolinite 0.001 M และจาก Na-Kaolinite 0.01 M เป็น Ca-Kaolinite 0.01 M ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเกิดจากอนุภาคดินมีการจัดเรียงตัวแบบกระจาย (Sridharan et al., 1973) ระดับการกระจายจะมีมากขึ้นตามความเข้มข้นและความแรงของประจุบวก ดังจะเห็นได้จากพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.2) และอนุภาคดินที่ลดลง (รูปที่ 4.3) ส่งผลให้พิกัดเหลวมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพิกัดพลาสติก (ตารางที่ 4.2) ดังนั้นดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์จึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 การเพิ่มขึ้นของพิกัดเหลวทำให้ดินคาโอลิไนท์มีพฤติกรรมการบวมตัวและมีค่าแอสคิวิตีสูงขึ้น จากข้อสรุปนี้ผู้เขียนขอเสนอแบบจำลองโครงสร้างดิน (Soil Structure) ที่น่าจะเป็นของดินคาโอลิไนท์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและความแรงของประจุบวก ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานของดินคาโอติไนท์
ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
และชนิดของประจุบวก

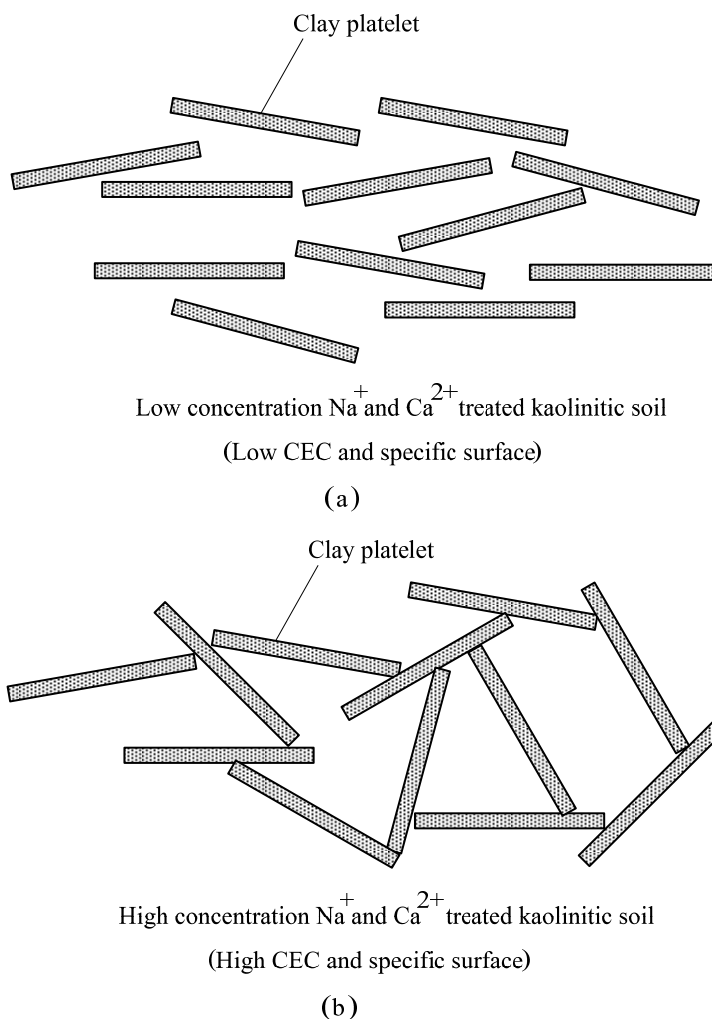
Description of sample	pH	Specific surface (m ² /g)	CEC (meq/100gm)	FSR	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Activity, A
1. Kaolinite								
- Na 0.001 M	6.64	-	-	-	54.2	25.6	28.6	-
- Na 0.01 M	6.50	-	-	-	78.4	27.2	51.2	-
- Ca 0.001 M	6.48	20.91	7.20	0.69	59.4	25.7	33.7	0.46
- Ca 0.01 M	6.39	28.38	9.60	0.72	81.1	28.2	52.9	0.69
2. Bentonite								
- Na 0.0001 M	7.62	-	-	-	131.2	25.9	105.3	-
- Na 0.001 M	8.31	-	-	-	126.7	25.8	100.9	-
- Ca 0.0001 M	7.95	101.10	42.40	1.16	128.8	26.1	102.7	2.28
- Ca 0.001 M	8.66	87.11	31.60	0.56	101.8	24.3	77.5	1.94
3. Bangkok clay								
- Na 0.01 M	6.80	-	-	-	70.6	27.7	42.9	-
- Na 0.1 M	6.74	-	-	-	99.6	28.4	71.2	-
- Ca 0.01 M	6.20	69.48	20.40	0.71	77.3	28.7	48.6	0.85
- Ca 0.1 M	6.54	78.24	26.30	1.18	105.1	29.0	76.1	1.12



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดของเม็ดดินของดินคาโอลิไนต์ ดินเบนโทไนต์ และดินเหนียวกรุงเทพ
เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุบวก

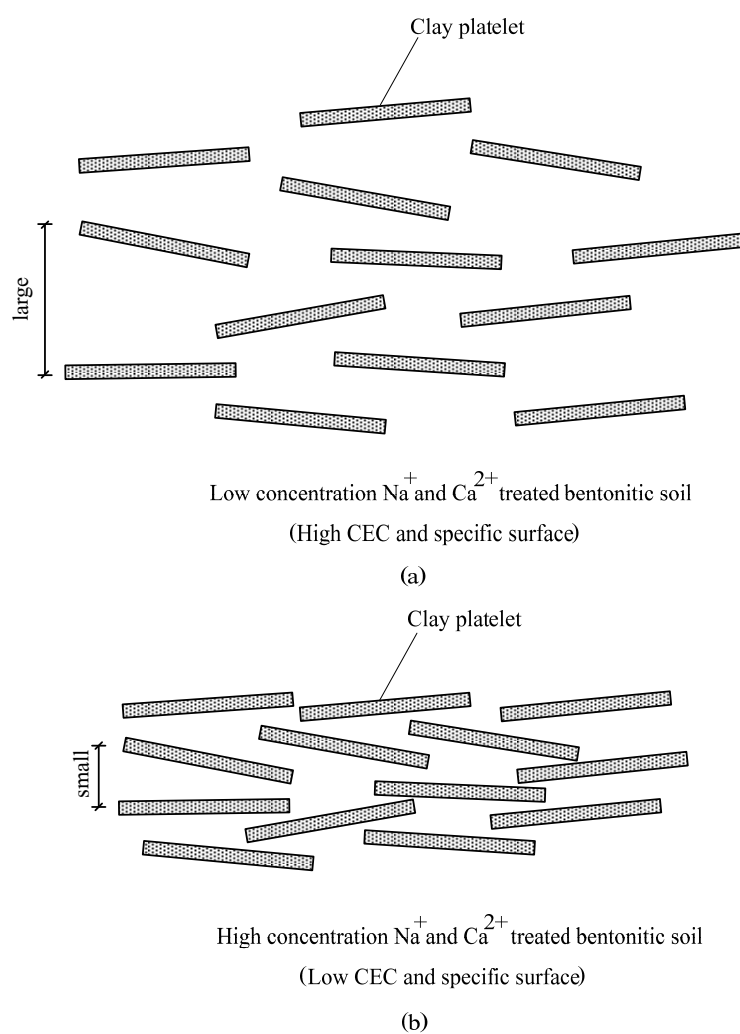


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์
ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
และชนิดของประจุบวก



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของประจุบวกต่อโครงสร้างของดินคาโอลิไนท์

สำหรับดินเบนโทไนท์ ค่าพิกัดเหลวลดลงเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 131.2 เปอร์เซ็นต์ เป็น 126.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของประจุบวก จาก Na-Bentonite 0.0001 M เป็น Na-Bentonite 0.001 M ในทำนองเดียวกับดินแคลเซียมเบนโทไนท์ (Ca-Bentonite) พิกัดเหลวลดลงจาก 128.8 เปอร์เซ็นต์ เป็น 101.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 0.0001 M เป็น 0.001 M นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนชนิดของประจุบวกจากดินโซเดียมเบนโทไนท์เป็นดินแคลเซียมเบนโทไนท์ที่ความเข้มข้นของสารละลายที่เท่ากันพบว่าพิกัดเหลวลดลง โดยลดลงจาก 131.2 เปอร์เซ็นต์ (Na-Bentonite 0.0001M) เป็น 128.8 เปอร์เซ็นต์ (Ca-Bentonite 0.0001 M) และ 126.7 เปอร์เซ็นต์ (Na-Bentonite 0.001 M) เป็น 101.8 เปอร์เซ็นต์ (Ca-Bentonite 0.001 M) เนื่องจากพิกัดเหลวลของดินเบนโทไนท์ถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นประจุกระจายตัว (Diffusion double layer) เมื่อความเข้มข้นและชนิดของ



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของประจุบวกต่อโครงสร้างของดินเบนโทไนท์

การเปลี่ยนแปลงของพิกัดเหลว ดัชนีสภาพพลาสติก อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ แอคติวิตี และการกระจายตัวของเม็ดดินของดินเหนียวกรุงเทพ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกมีแนวโน้มคล้ายกับดินคาโอไลไนท์ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินเหนียวกรุงเทพจัดเป็นดินเหนียวบวมตัวต่ำ

พิกัดพลาสติกของดินทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าพิกัดพลาสติกถูกควบคุมโดยคุณสมบัติทางกายภาพของดินมากกว่าคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน

4.4 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อพิกัดแอคติวิตีและการกระจายขนาดของเม็ดดิน

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ (Pre-testing condition) ต่อพิกัดแอคติวิตี และค่าแอคติวิตี ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้ค่าพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกของดินเหนียวทุกชนิดที่ความเข้มข้นของสารละลายในช่องว่างต่าง ๆ มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมตัวอย่างแบบเปียก นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้งของดินเหนียวทุกชนิดยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำ (ดินคาโอไลไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ) เช่น เมื่อเปลี่ยนจากดิน Na-Bangkok clay 0.01 M เป็น Ca-Bangkok clay 0.1 M ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าพิกัดเหลวมีค่าเพิ่มจาก 5.3 เปอร์เซ็นต์ เป็น 22.3 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าความแตกต่างเพิ่มจาก 4.7 เปอร์เซ็นต์ เป็น 28.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าพิกัดพลาสติกของดินทั้งหมดมีความแตกต่างกันน้อยระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้ง เนื่องจากพิกัดพลาสติกถูกควบคุมโดยคุณสมบัติทางกายภาพของดินมากกว่าคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน แอคติวิตีมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากพิกัดเหลวมีค่าลดลงตามการลดลงของปริมาณดินเหนียว

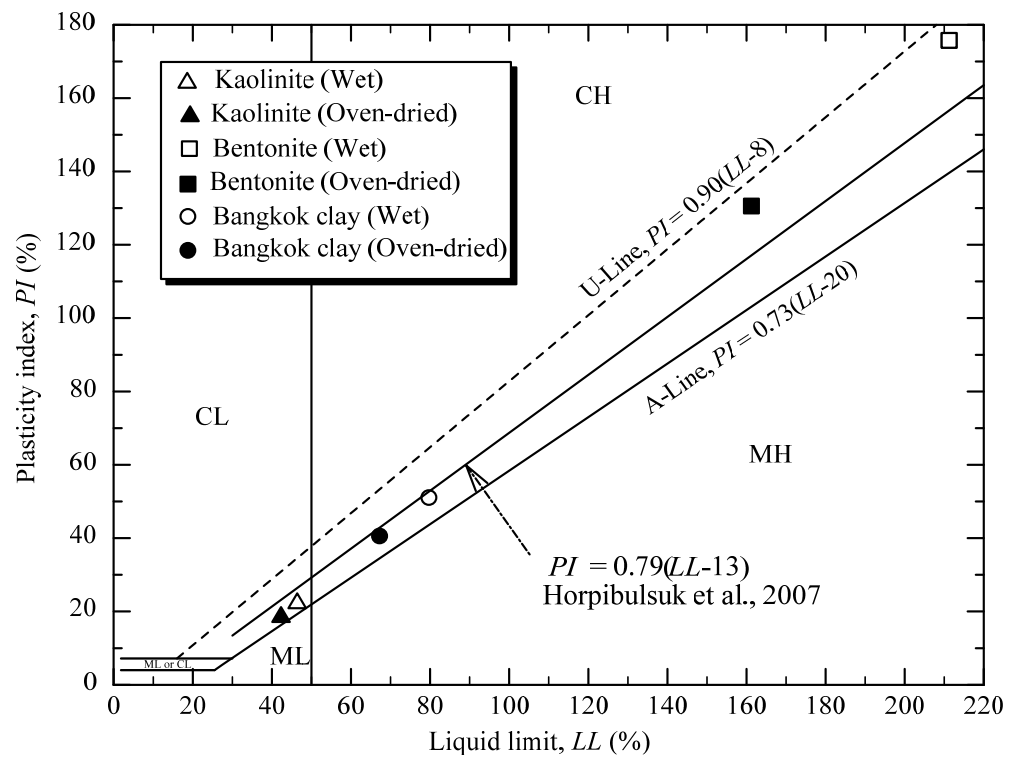
รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติก จะเห็นได้ว่า ความเป็นพลาสติกของดินทุกประเภทลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเตรียมดินแบบแห้ง การลดลงของพิกัดเหลวอาจอธิบายได้จากกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า การเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้แผ่นดินเหนียวรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ดังจะเห็นได้จากการลดลงของปริมาณดินเหนียว ($< 2\mu\text{m}$) ปริมาณดินเหนียวของดินคาโอไลไนท์ลดลงจาก 69.3 เหลือ 66.5 เปอร์เซ็นต์ ดินเบนโทไนท์ลดลงจาก 48.3 เหลือ 41.6 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียวกรุงเทพลดลงจาก 61.4 เหลือ 57.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อพิกัดอัตราเบร็กของดินกาโอลิไนท์
ดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวประจวบฯ ชนิดเดียว

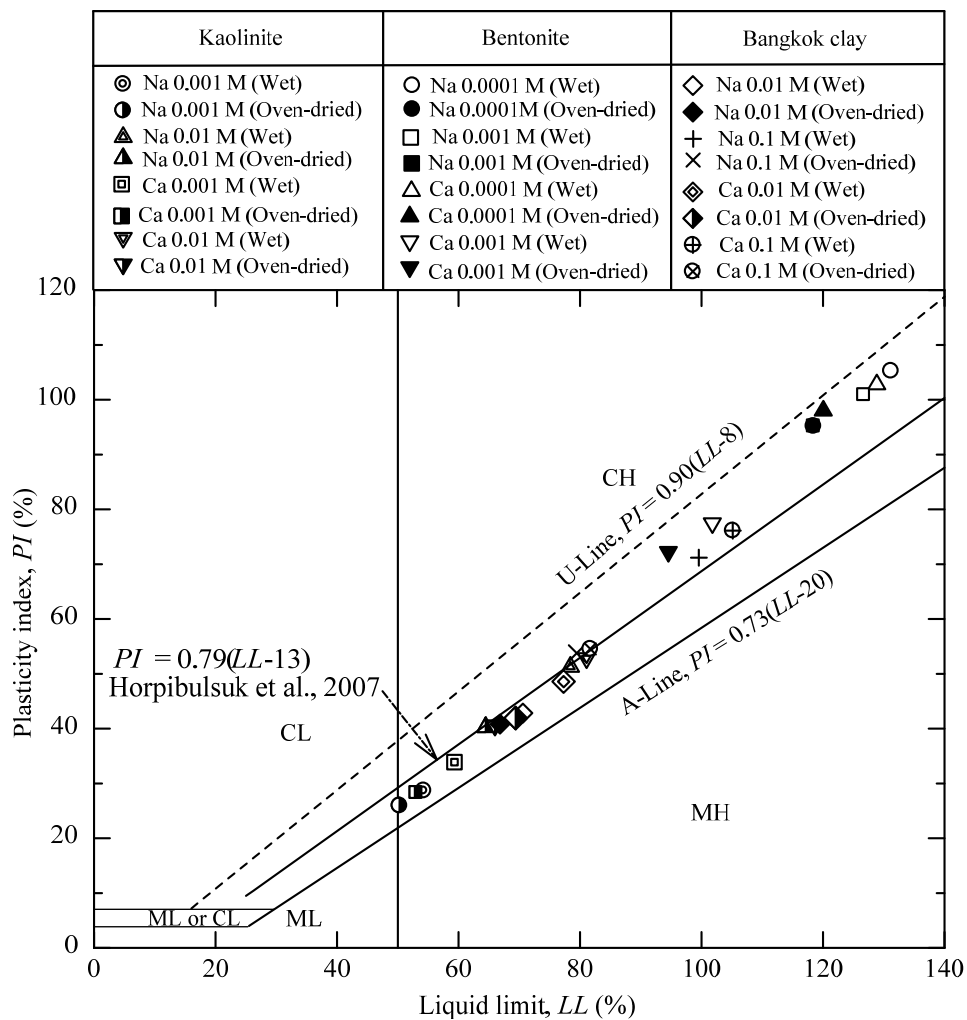
Description of sample	LL (%)		PL (%)		PI (%)		Percent Reduct- ion in LL (%)	Percent Reduct- ion in PI (%)
	Wet	Oven- dried	Wet	Oven- dried	Wet	Oven- dried		
1. Kaolinite								
- Untreated	46.4	41.3	24.2	23.8	22.2	17.5	11.0	21.4
- Na 0.001 M	54.2	50.3	25.6	24.3	28.6	26.0	7.3	9.5
- Na 0.01 M	78.4	64.5	27.2	24.2	51.2	40.3	17.8	21.5
- Ca 0.001 M	59.4	53.0	25.7	24.7	33.7	28.3	10.8	16.1
- Ca 0.01 M	81.1	66.0	28.2	25.4	52.9	40.6	18.6	23.2
2. Bentonite								
- Untreated	211.4	161.4	35.8	31.0	175.6	130.4	23.6	25.7
- Na 0.001 M	131.2	125.1	25.9	23.9	105.3	101.2	4.7	3.9
- Na 0.01 M	126.7	118.4	25.8	22.0	100.9	96.4	6.8	5.7
- Ca 0.001 M	128.8	120.0	26.1	23.2	102.7	96.8	6.5	4.7
- Ca 0.01 M	101.8	94.5	24.3	22.3	77.5	72.2	7.1	6.8
3. Bangkok clay								
- Untreated	79.9	67.4	29.0	27.0	50.9	40.4	15.6	20.6
- Na 0.01 M	70.6	66.8	27.7	26.0	42.9	40.8	5.3	4.7
- Na 0.1 M	99.6	79.5	28.4	25.7	71.2	53.8	20.2	24.5
- Ca 0.01 M	77.3	69.4	28.7	27.5	48.6	41.9	10.2	13.7
- Ca 0.1 M	105.1	81.7	29.0	27.1	76.1	54.6	22.3	28.4

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อแอกติวิตี้ของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์
ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวประจวบฯ ชนิดเดียว

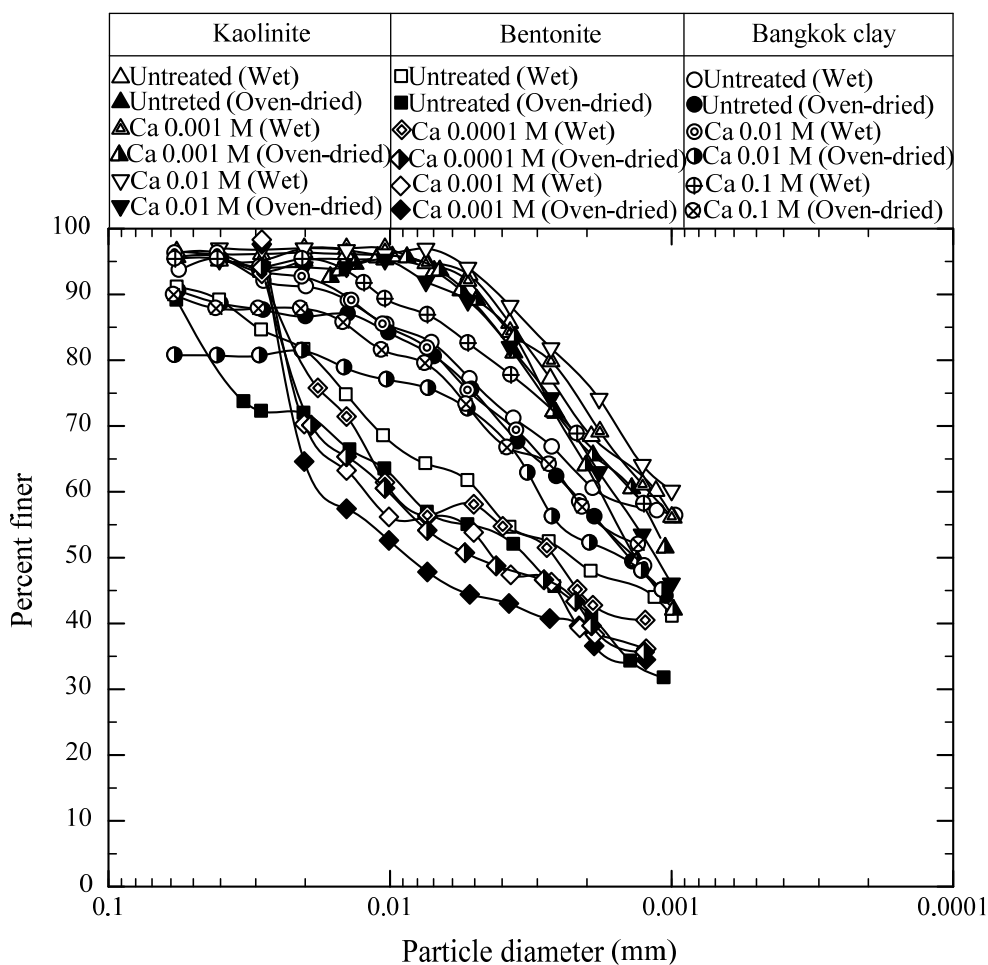
Description of sample	Activity, A	
	Wet	Oven-dried
1. Kaolinite		
- Untreated	0.32	0.27
- Ca 0.001 M	0.46	0.44
- Ca 0.01 M	0.69	0.62
2. Bentonite		
- Untreated	3.58	3.18
- Ca 0.001 M	2.28	2.25
- Ca 0.01 M	1.94	1.90
3. Bangkok clay		
- Untreated	0.82	0.70
- Ca 0.01 M	0.85	0.81
- Ca 0.1 M	1.12	0.96



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกของดินคาโอไลน์ที่ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพประจวบฯ ชนิดเดียว



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อการกระจายขนาดของเม็ดดินของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวประจวบฯ ชนิดเดียว

ผลทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเตรียมตัวอย่างแบบแห้ง แรงผลักระหว่างแผ่นดินเหนียว (Repulsive force) จะมีค่าลดลง ดังจะเห็นได้จากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีการเติมน้ำให้กับดินตัวอย่างก่อนการทดสอบอนุภาคดินก็ไม่สามารถแตกตัวได้ ด้วยเหตุนี้เองความสามารถในการดูดซับน้ำของดินจึงลดลง ส่งผลให้พิกัดเหลวลดลง

4.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อคุณสมบัติการ

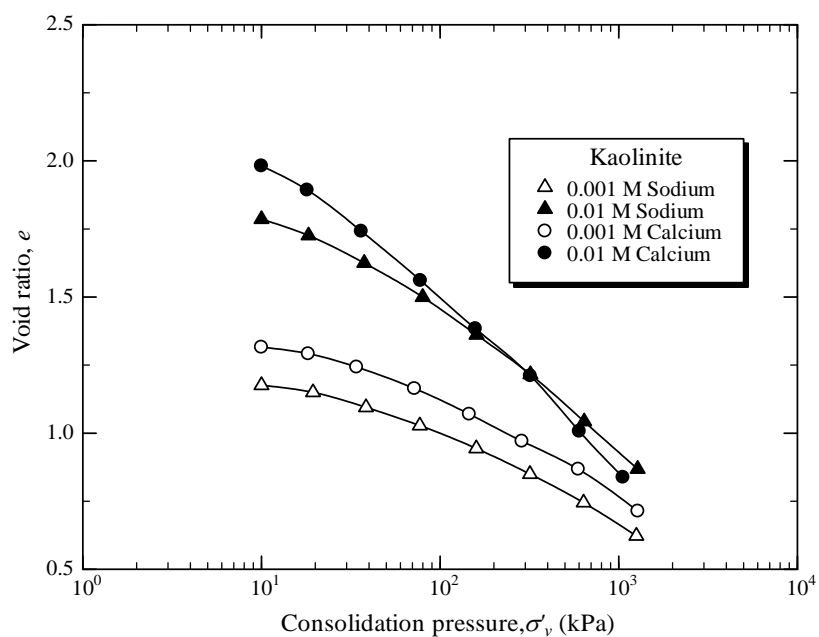
อัดตัว

4.5.1 อิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผล

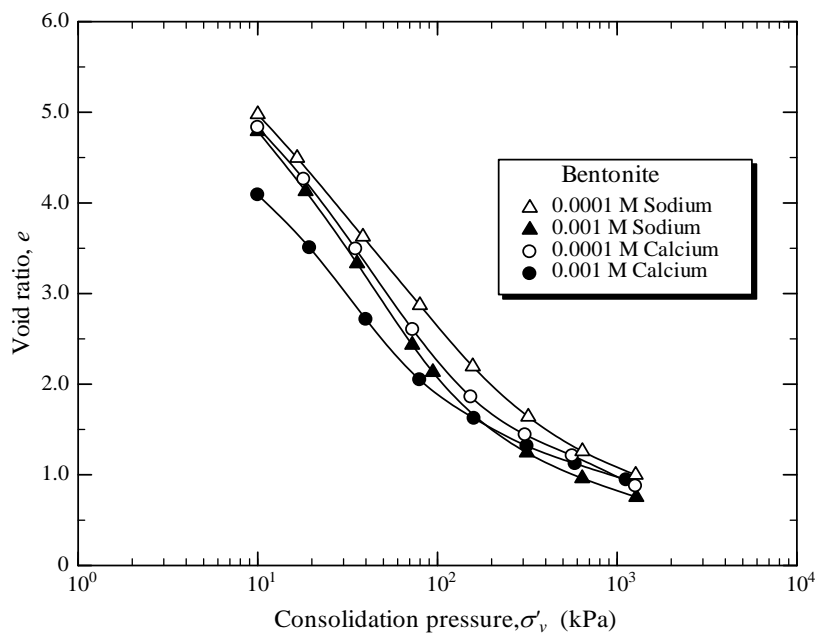
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงความเค้นและประสิทธิผลของดินคาโอลิไนท์ จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ดินคาโอลิไนท์เสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้นภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกมากขึ้น อนุภาคของดินจะจัดเรียงตัวแบบกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น และดินสามารถเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้น

รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเบนโทไนท์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดของประจุบวก จะเห็นว่าดินเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่ต่ำลงภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน เมื่อความเข้มข้นและชนิดประจุบวกเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการอัดตัวของดินเบนโทไนท์ถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นประจุกระจายตัว เมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นประจุกระจายตัวลดลงมีผลทำให้ช่องว่างในดินลดลงตาม

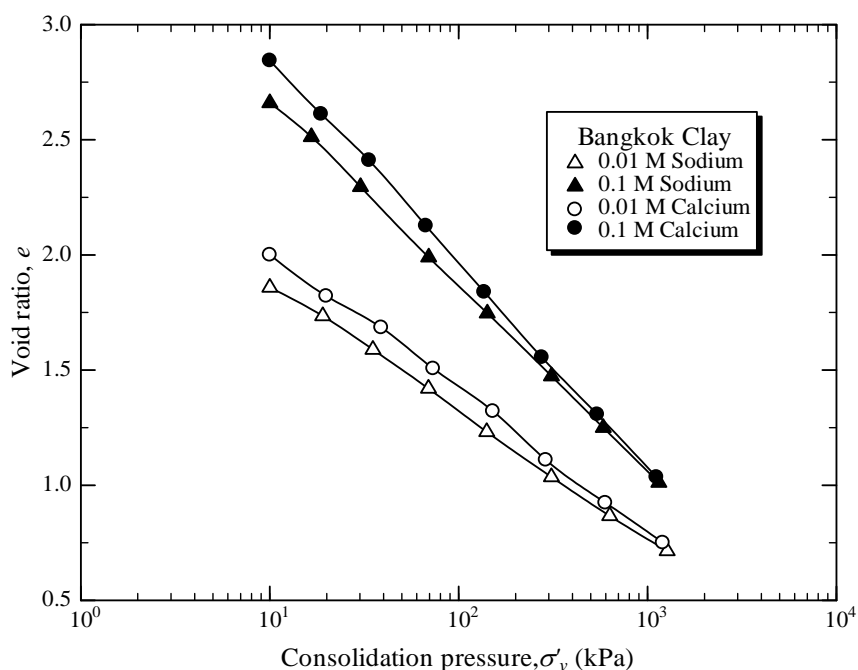
รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดของประจุบวก จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟการอัดตัวคายน้ำมีลักษณะเช่นเดียวกับดินคาโอลิไนท์ กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ดินเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้นภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของดินคาโอลินที่ประจุบวกชนิดเดียว



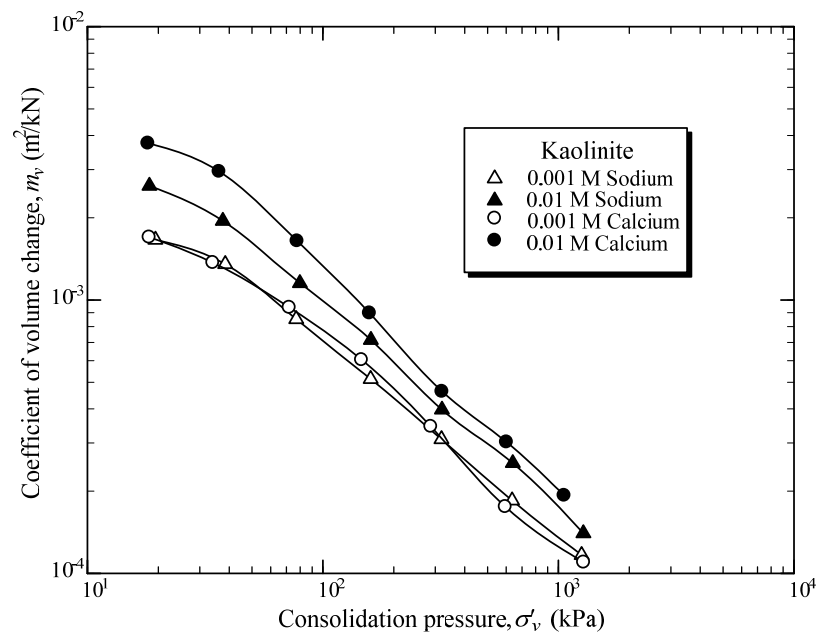
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของดินเบนโทไนท์ที่ประจุบวกชนิดเดียว



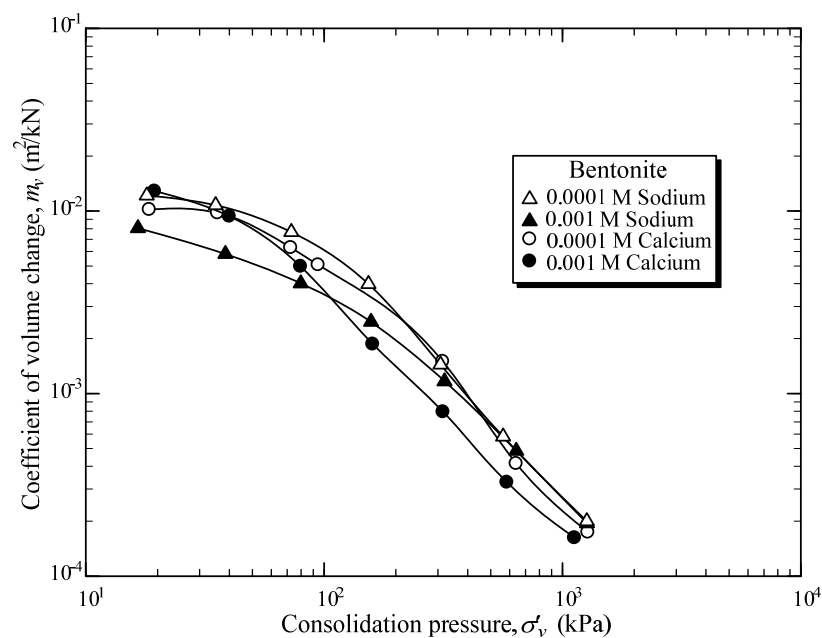
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนโพรงของ
ดินเหนียวกรุงเทพฯประจุบวกชนิดเดียว

4.5.2 อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

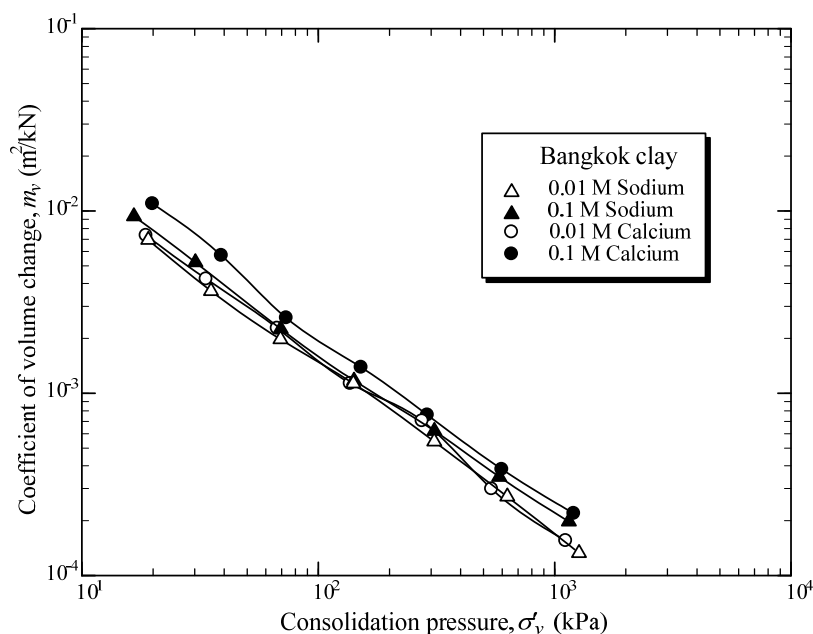
สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน รูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินคาโอลินท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดของประจุบวก จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินคาโอลินท์มีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน ซึ่งตรงข้ามกับดินเบนโทไนท์ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับดินคาโอลินท์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินคาโอไลไนท์ประเภทชนิดเดียว



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเบนโทไนท์ประเภทชนิดเดียว

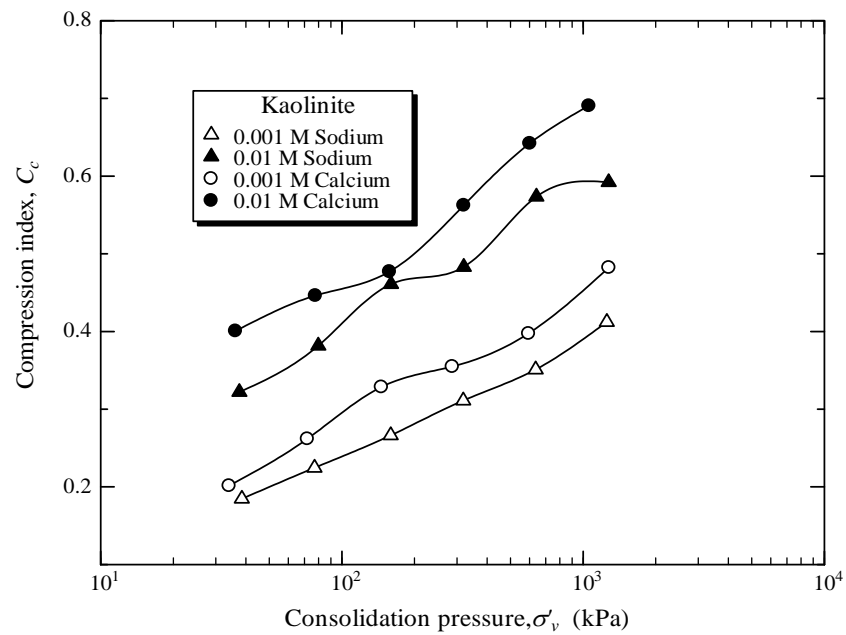


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว

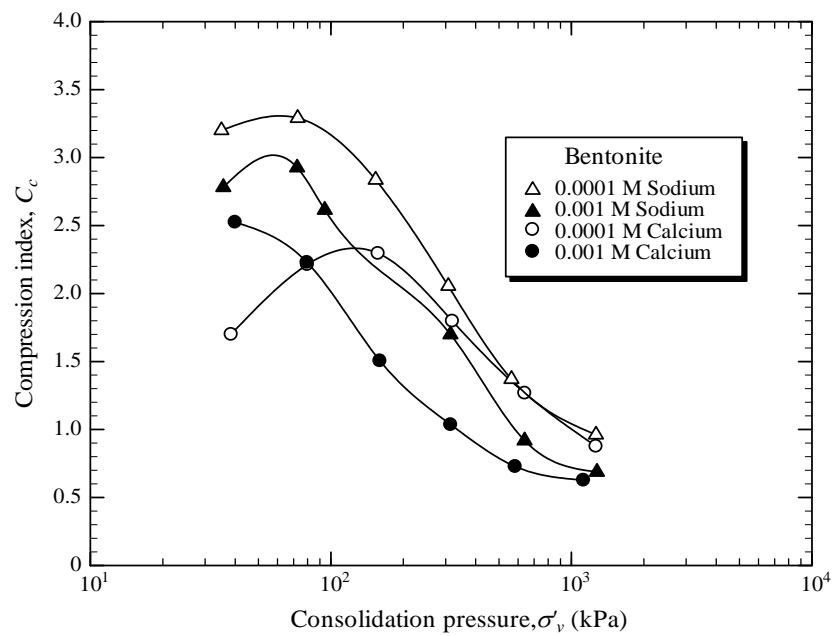
4.5.3 อิทธิพลต่อดัชนีการอัดตัว

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัว (Compression index) ของดินคาโอลิไนต์เมื่อเปลี่ยนแปลงความชื้นและชนิดของประจุบวก จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความชื้นและชนิดของประจุบวก ดัชนีการอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักกดทับเท่ากัน และค่าดัชนีการอัดตัวของดินคาโอลิไนต์ประจุบวกชนิดเดียว (Homoionic Kaolinite) ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกดทับที่มากขึ้นด้วย

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัวของดินเบนโทไนต์เมื่อเปลี่ยนแปลงความชื้นและชนิดของประจุบวก จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความชื้นและชนิดของประจุบวก ค่าดัชนีการอัดตัวมีแนวโน้มลดลงภายใต้น้ำหนักกดทับเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีการอัดตัวของดินเบนโทไนต์ประจุบวกชนิดเดียวมีค่าสูงที่ ในช่วงน้ำหนักกดทับน้อยค่าหนึ่ง จากนั้นจะลดลงเมื่อน้ำหนักกดทับเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเบนโทไนต์ถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นประจุกระจายตัว ดังนั้น เมื่อน้ำหนักกดทับดินมาก ๆ ชั้นความหนาของชั้นประจุกระจายตัวถูกบีบอัดทำให้เกิดแรงต้านทานการอัดตัว ส่งผลให้ดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลงตาม (Sridharan et al., 1987)

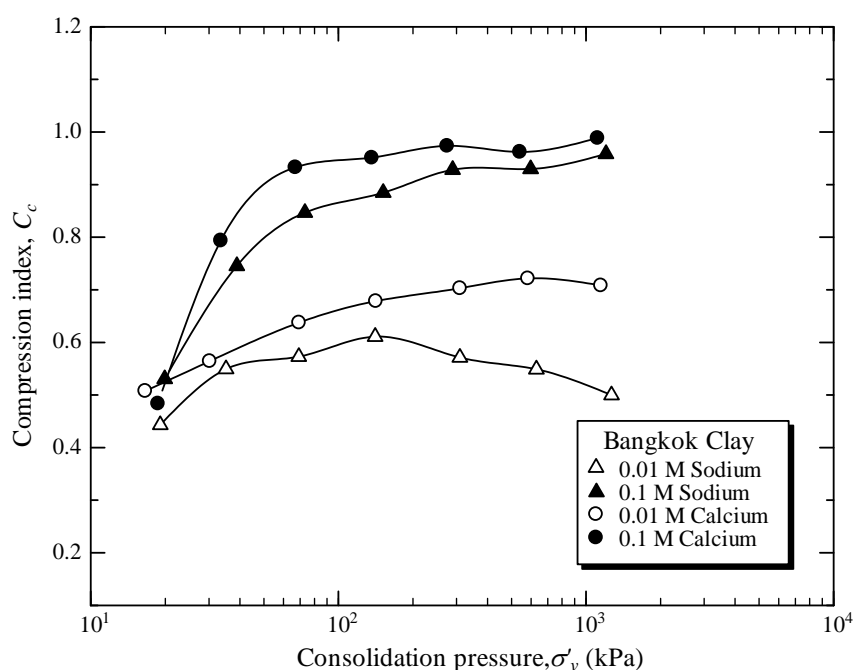


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัวของ ดินคาโอลิไนท์ที่ประจุวกชนิดเดียว



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัวของ ดินเบนโทไนท์ที่ประจุวกชนิดเดียว

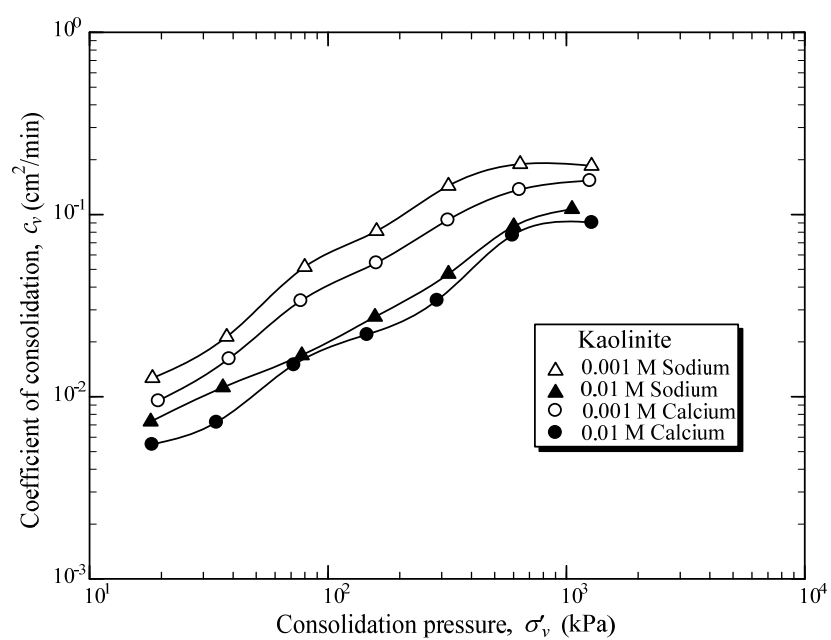
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงความชื้นและชนิดของประจุบวกของดินเหนียวกรุงเทพ จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อความชื้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการอัดตัวมีแนวโน้มคล้ายดินคาโอลิไนท์ คือ เพิ่มขึ้นที่น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำหนักกดทับมากขึ้น ค่าดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียวมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



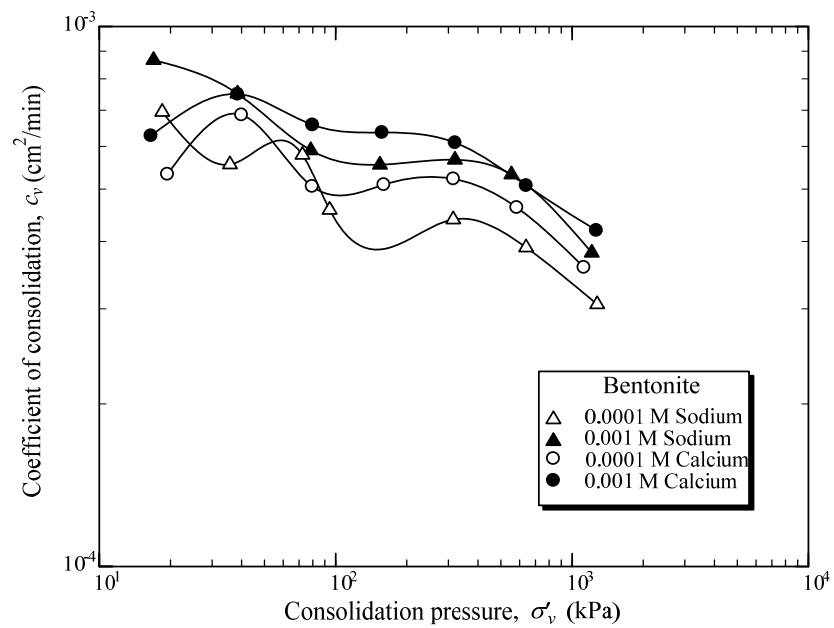
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว

4.5.4 อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ

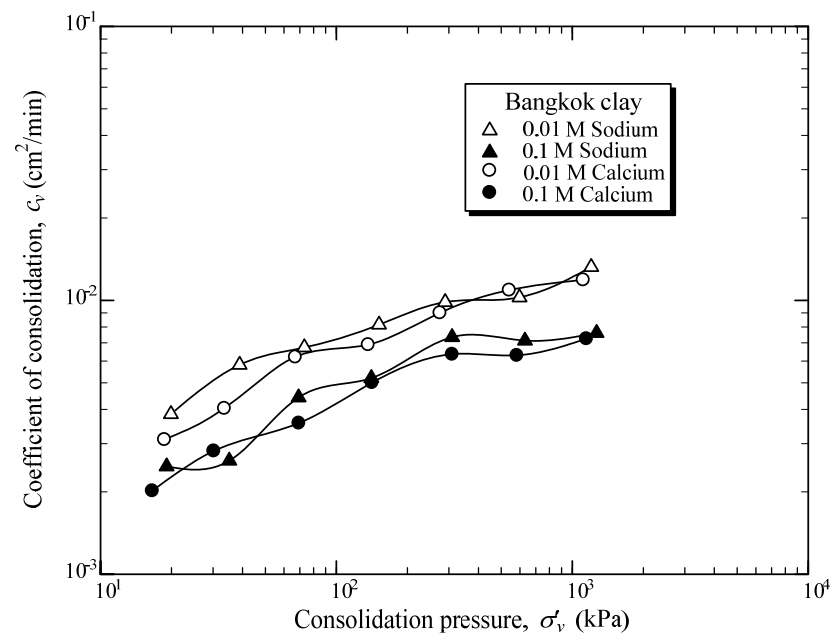
รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพเมื่อเปลี่ยนแปลงความชื้นและชนิดของประจุบวกตามลำดับ รูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำหนักกดทับสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินคาโอลิไนท์ประจุบวกชนิดเดียวทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินคาโอลิไนท์มีแนวโน้มลดลงภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน เนื่องจากเมื่อความชื้นและชนิดของประจุบวกสูงขึ้น อนุภาคดินจะรวมตัวกันแบบกระจุกกระจายมากขึ้นจึงทำให้น้ำไหลผ่านดินได้ไม่สะดวก ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าลดลงภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน ซึ่ง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
ของดินคาโอไลไนท์ที่ประจุวขนิดเดียว



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
ของดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว



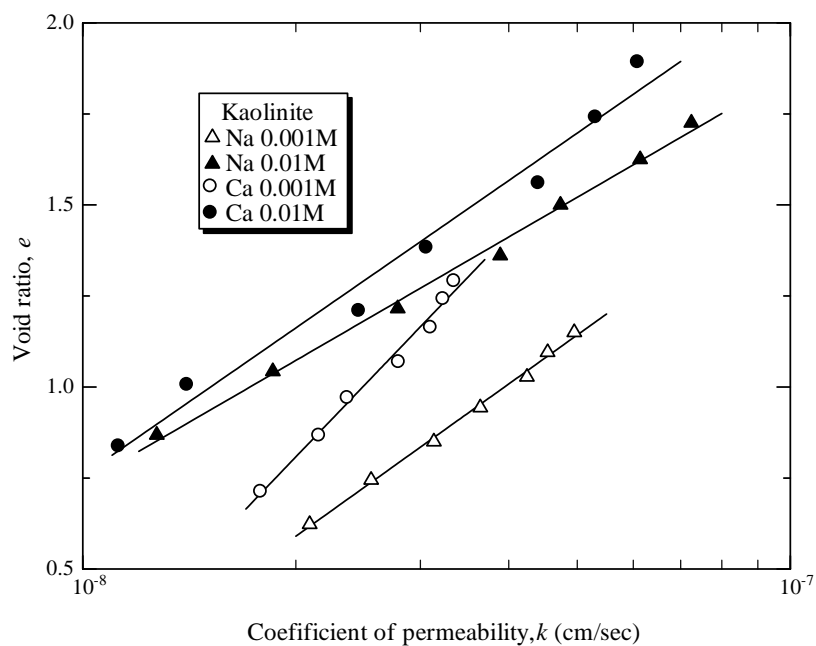
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ
ของดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว

4.5.5 อิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

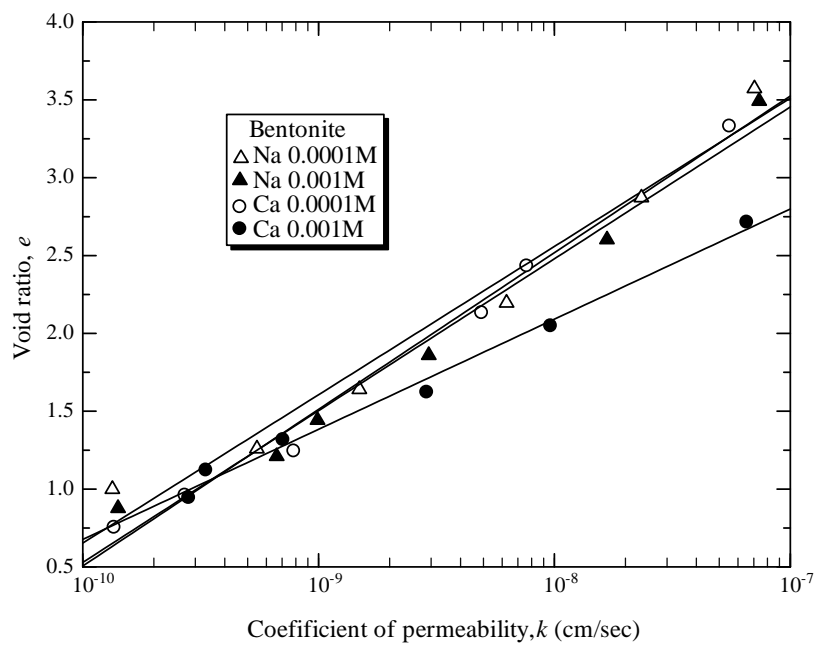
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินคาโอลิไนต์ เมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าภายใต้อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินคาโอลิไนต์จะมีค่าลดลง เช่นที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 1.00 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกจาก Na-Kaolinite 0.001 M เป็น Ca-Kaolinite 0.01 M สาเหตุที่สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและชนิดของประจุบวก อนุภาคดินจะจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจายและเกิดการกระจายตัวของอนุภาคดินที่มีขนาดเล็ก (Rao et al., 1989) ทำให้ดินที่บดน้ำมากขึ้นน้ำจึงไหลผ่านดินได้ไม่สะดวก

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเบนโทไนต์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและชนิดของประจุบวก เมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้นภายใต้อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเบนโทไนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกจาก Na-Bentonite 0.0001 M เป็น Ca-Bentonite 0.001 M ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นประมาณ 150 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 2.0 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น และชนิดของประจุบวก เนื่องจากความหนาของชั้นประจุกระจายตัวของอนุภาคดินลดลง ดังนั้นความที่บดน้ำของดินจึงน้อยลงทำให้น้ำไหลผ่านดินได้ง่าย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินสูงตาม ซึ่งโครงสร้างของดินที่น่าจะเป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 4.24

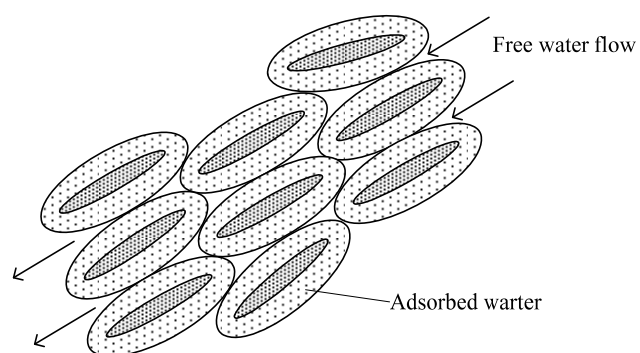
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวกรุงเทพฯเมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับดินคาโอลิไนต์



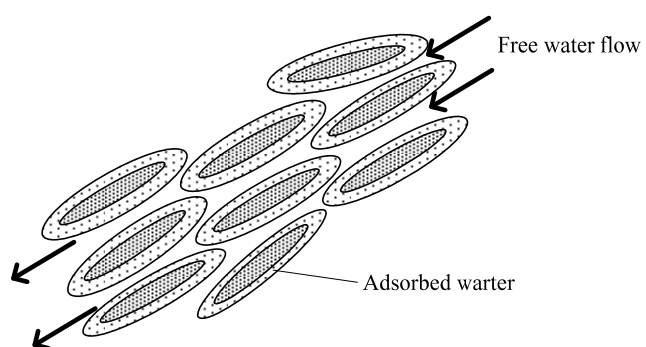
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
ดินคาโอลินในที่ประจุบวกชนิดเดียว



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
ดินเบนโทไนท์ประจุบวกชนิดเดียว

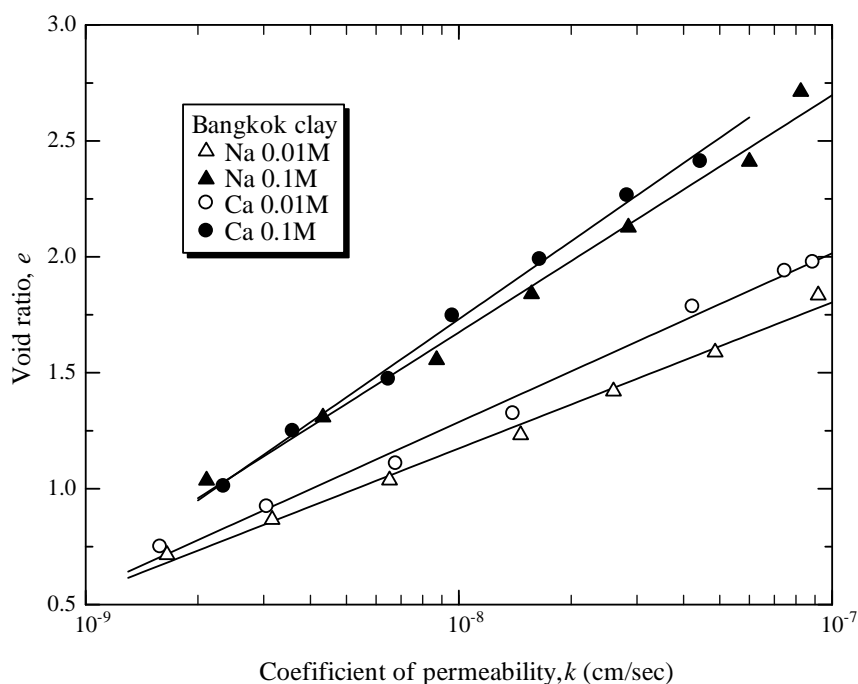


Low concentration Na^+ and Ca^{2+} treated soil
(high CEC and specific surface)



High concentration Na^+ and Ca^{2+} treated soil
(reduced CEC and specific surface)

รูปที่ 4.24 อิทธิพลของประจุบวกต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเบนโทไนท์



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
ดินเหนียวกรุงเทพประจุบวกชนิดเดียว

4.6 เส้นสถานะเนื้อแท้

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผล และกราฟ Normalization (e/e_L และ $\log \sigma'_v$) ของดินเหนียวคาโอไลน์ ดินเหนียวเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ ที่ความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพและดินเหนียวคาโอไลน์ (ดินเหนียววมตัวต่ำ) สามารถแทนได้ด้วยสมการเส้นตรง และความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และ $\log \sigma'_v$ ใกล้เคียงกับสมการที่เสนอโดย Nagaraj et al. (1998) ขณะที่ดินเหนียวเบนโทไนท์ (ดินเหนียววมตัวสูง) ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นสูงมาก กราฟการอัดตัวคายน้ำมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง และความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และ $\log \sigma'_v$ มีความแตกต่างกับสมการทั่วไปของดินเหนียววมตัวต่ำอย่างเห็นได้ชัด

จากผลการศึกษา สามารถสรุปได้ว่าสมการทั่วไปที่เสนอโดย Nagaraj et al. (1998) สามารถใช้ในการทำนายดัชนีการอัดตัว (Compression index, C_c) ของดินเหนียววมตัวต่ำ ซึ่งดัชนีการอัดตัวถูกสมมติเป็นเส้นตรงและประมาณได้เท่ากับ $0.276e_L$ ในกรณีของดินเหนียววมตัวสูง ดัชนีการอัดตัวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและไม่สามารถประมาณได้จากพิกัดเหลว

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีอัตราส่วน โพร่ง (Void index, I_v) และ ล็อกการิทึมของความเค้นประสิทธิผล ของดินเหนียวคาโอลิไนท์ ดินเหนียวเบนโทไนท์ และ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกต่าง ๆ ในทำนองเดียวกันกับสมการทั่วไป ของ Nagaraj et al. (1998) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง I_v และ $\log \sigma'_v$ ที่เสนอโดย Burland (1990) มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินเหนียวบวมตัวต่ำเท่านั้น แต่ e_{100} (อัตราส่วนโพร่งที่ความเค้น ประสิทธิภาพในแนวดิ่งเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล) ของทั้งดินเหนียวบวมตัวต่ำและสูงสามารถ ประมาณได้จาก e_L ซึ่งเสนอโดย Burland (1990) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 รูปที่ 4.29 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง $e_{100}-e_{1000}$ และ e_L ของดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง เมื่อ e_{1000} คือ อัตราส่วนโพร่งที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งเท่ากับ 1000 กิโลปาสกาล จะเห็นได้ว่าดินเหนียว บวมตัวสูง มีค่า $e_{100}-e_{1000}$ สูงกว่าดินเหนียวบวมตัวต่ำที่ e_L เดียวกัน (โดยไม่แปรผันตามความเข้มข้น และชนิดของประจุ) สำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำ สมการความสัมพันธ์สามารถใช้สมการของ Burland (1990) ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าสมการทั่วไปของ Nagaraj et al (1998) และ Burland (1990) สามารถใช้ได้เฉพาะกับดินเหนียวบวมตัวต่ำเท่านั้น

งานวิจัยนี้พยายามหาสมการการอัดตัวคายน้ำของทั้งดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง โดยนำเสนอตัวแปรตัวใหม่ที่เรียกว่าดัชนีอัตราส่วน โพร่งปรับปรุง (Modified void index, I'_v) ซึ่งมี นิยามดังสมการที่ 4.1

$$I'_v = \left(\frac{e - e_{50}}{e_{50} - e_{1000}} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ e_{50} คืออัตราส่วนโพร่งที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งเท่ากับ 50 กิโลปาสกาล รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีอัตราส่วน โพร่งปรับปรุงกับความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง จะเห็นได้ว่าทั้งดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูงล้วนอยู่บนกราฟเส้นโค้ง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วย สมการ log Polynomial นี้

$$I'_v = 0.029 \log \sigma_v'^3 - 0.112 \log \sigma_v'^2 - 0.733 \log \sigma_v' + 1.427 \quad (4.2)$$

สำหรับช่วง $10 \text{ kPa} < \sigma'_v < 1280 \text{ kPa}$, $|r|=0.981$

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนโพร่งที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล เป็นฟังก์ชันกำลังสามของอัตราส่วนโพร่งที่พิกัดเหลว ดังนั้น อัตราส่วนโพร่งที่ความ

$$e_{50} = 0.125e_L^3 - 0.727e_L^2 + 2.265e_L - 1.059 \quad (4.3)$$

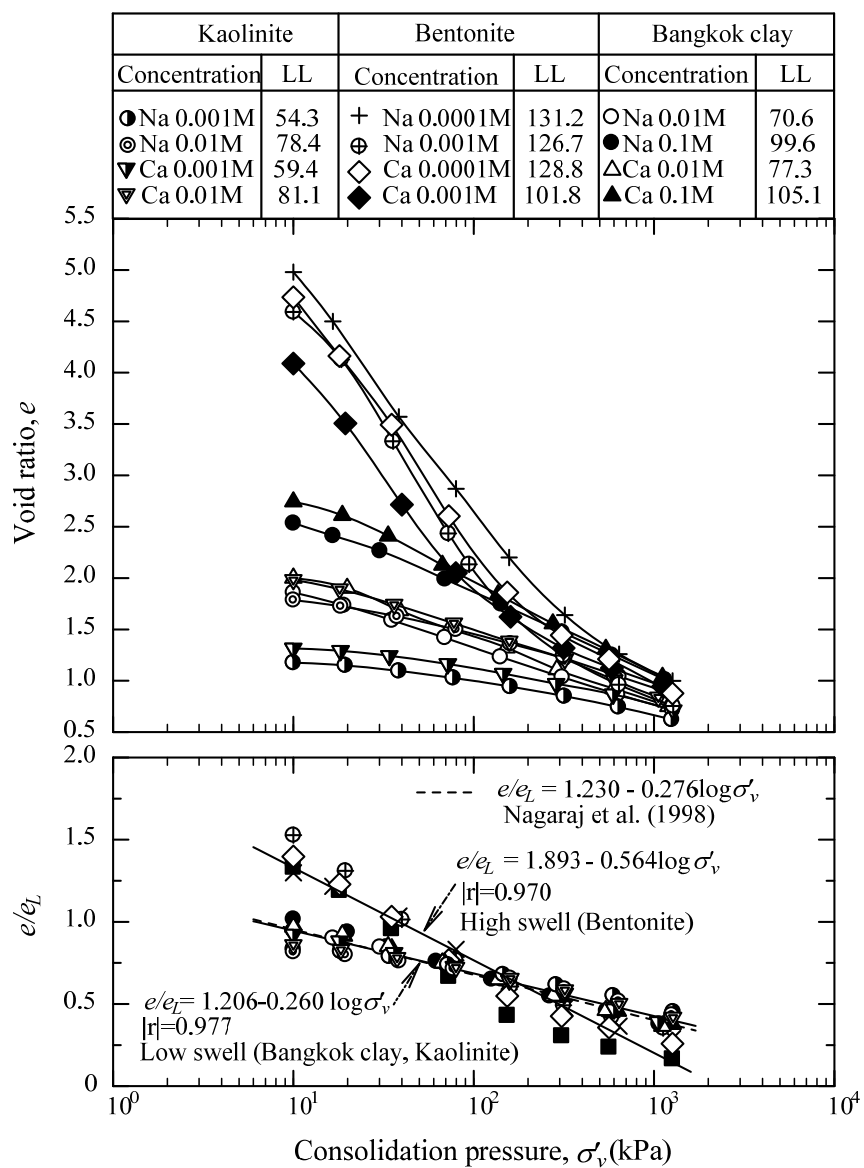
สำหรับช่วง $1.44 < e_L < 3.45$, $|r|=0.988$

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าตัวแปร $e_{50} - e_{1000}$ เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ดังนี้

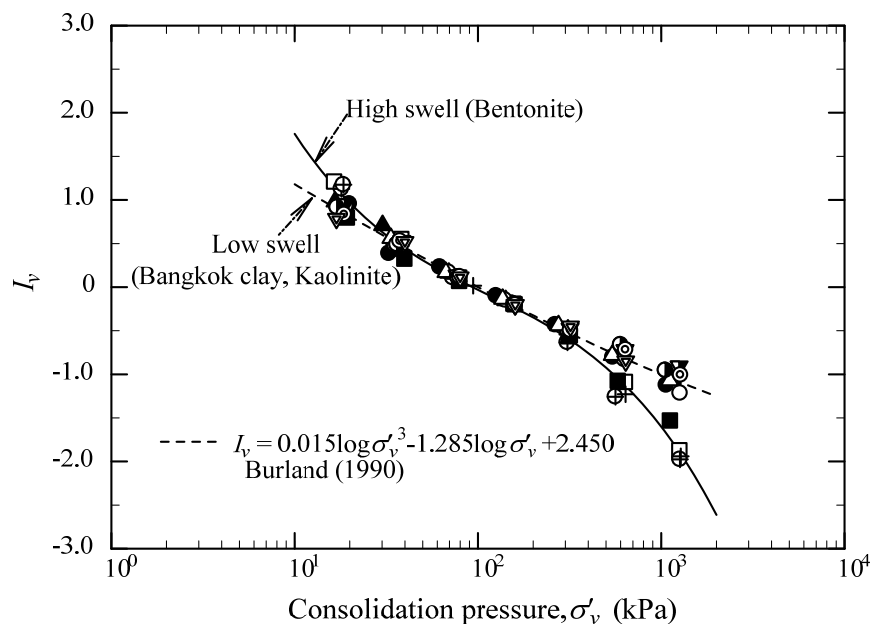
$$e_{50} - e_{1000} = 0.203e_L^3 - 1.185e_L^2 + 2.864e_L - 1.889 \quad (4.4)$$

สำหรับช่วง $1.44 < e_L < 3.45$, $|r|=0.980$

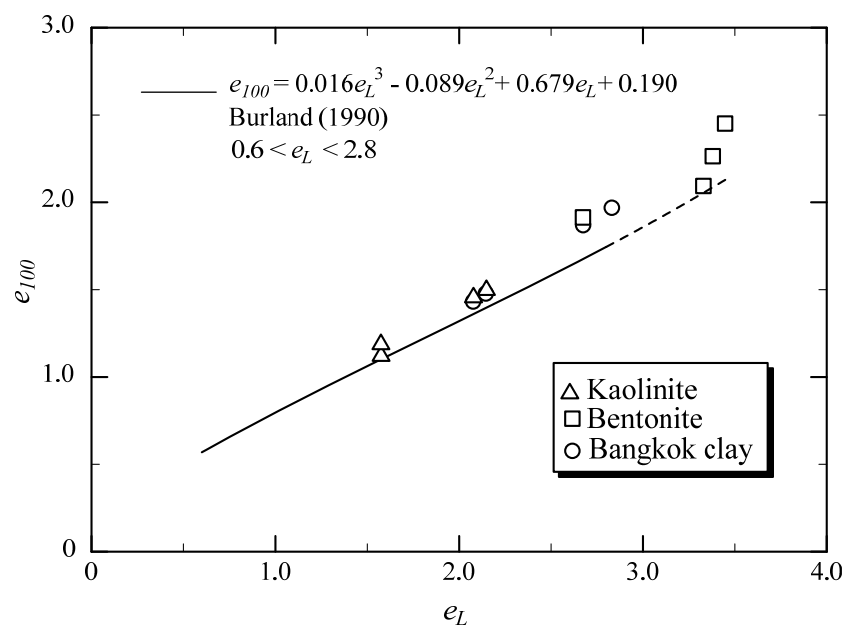
เมื่อนำสมการ 4.1 ถึง 4.4 ไปทำนายการอัดตัวคายน้ำของดิน Kleinbelt ton, Argile plastique, London clay, Wiener tegel, Magnus clay และ Lower cromer till (Burland, 1990) ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวต่างกันตั้งแต่ 0.663 ถึง 3.521 แสดงดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าสมการ 4.1 ถึง 4.4 ทำนายการอัดตัวคายน้ำได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบอย่างมาก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าสมการ 4.1 ถึง 4.4 สามารถประมาณการอัดตัวคายน้ำได้ทั้งสำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง



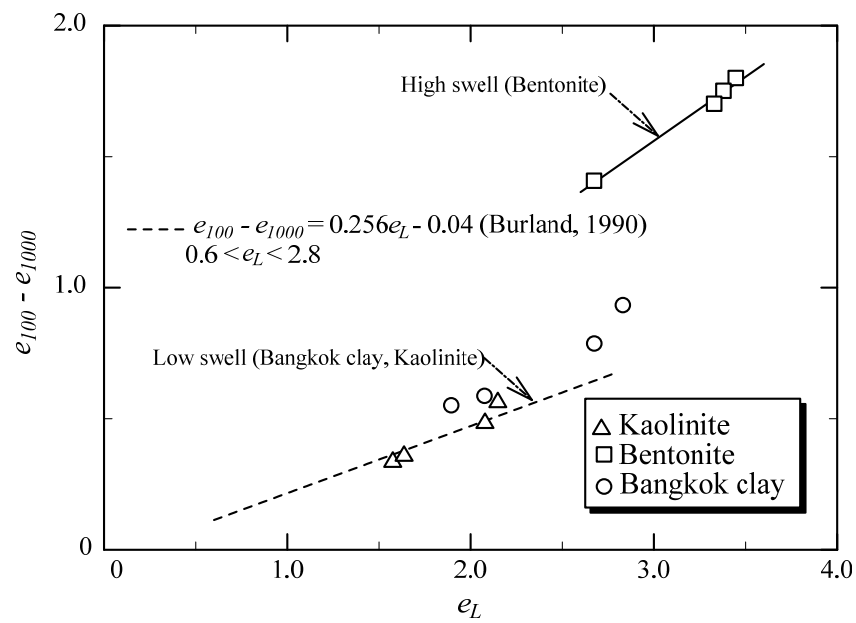
รูปที่ 4.26 เส้นการอัดตัวคายน้ำและเส้นสถานะเนื้อแท้ของดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพ



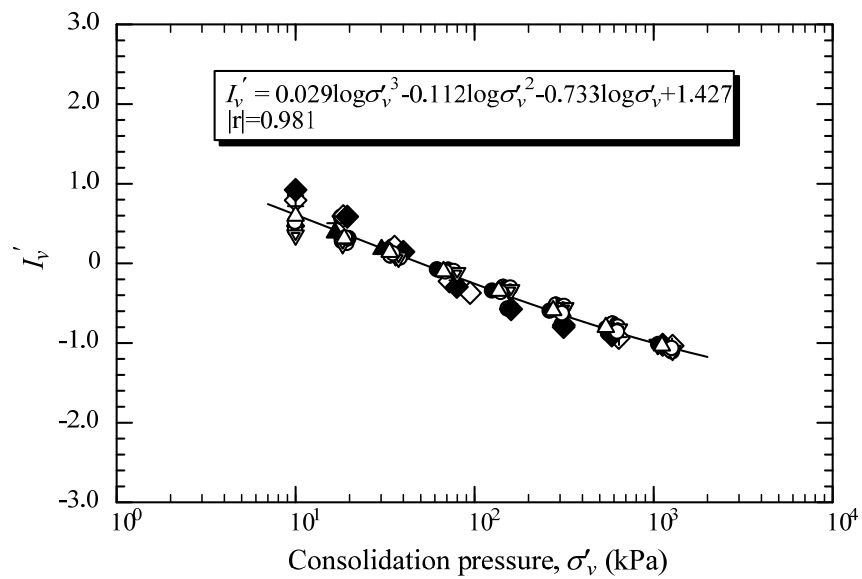
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลและดัชนีของอัตราส่วนโพรง



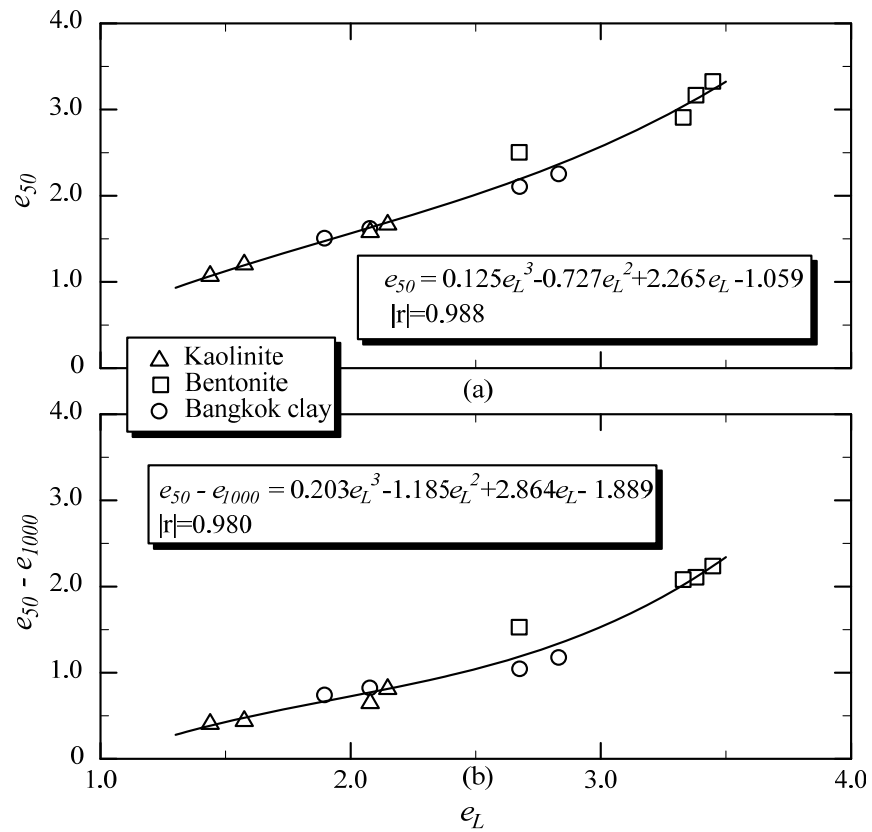
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผล 100 กิโลปาสคาล และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว



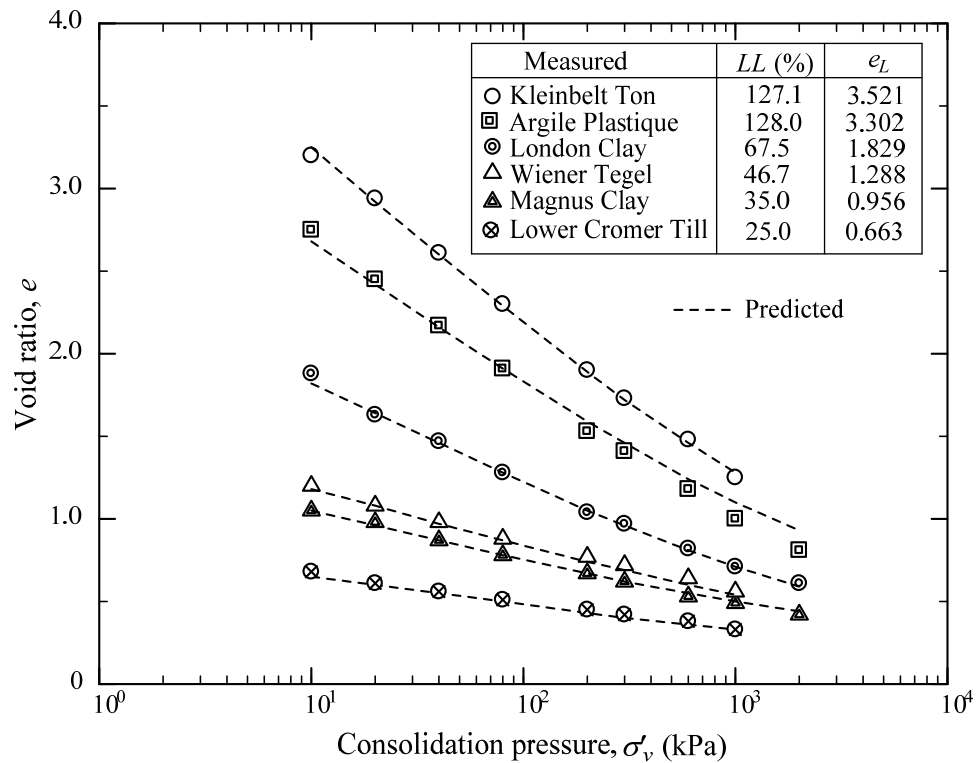
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(e_{100} - e_{1000})$ และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุงและความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง a) e_{50} และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว
b) $(e_{50} - e_{1000})$ และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว

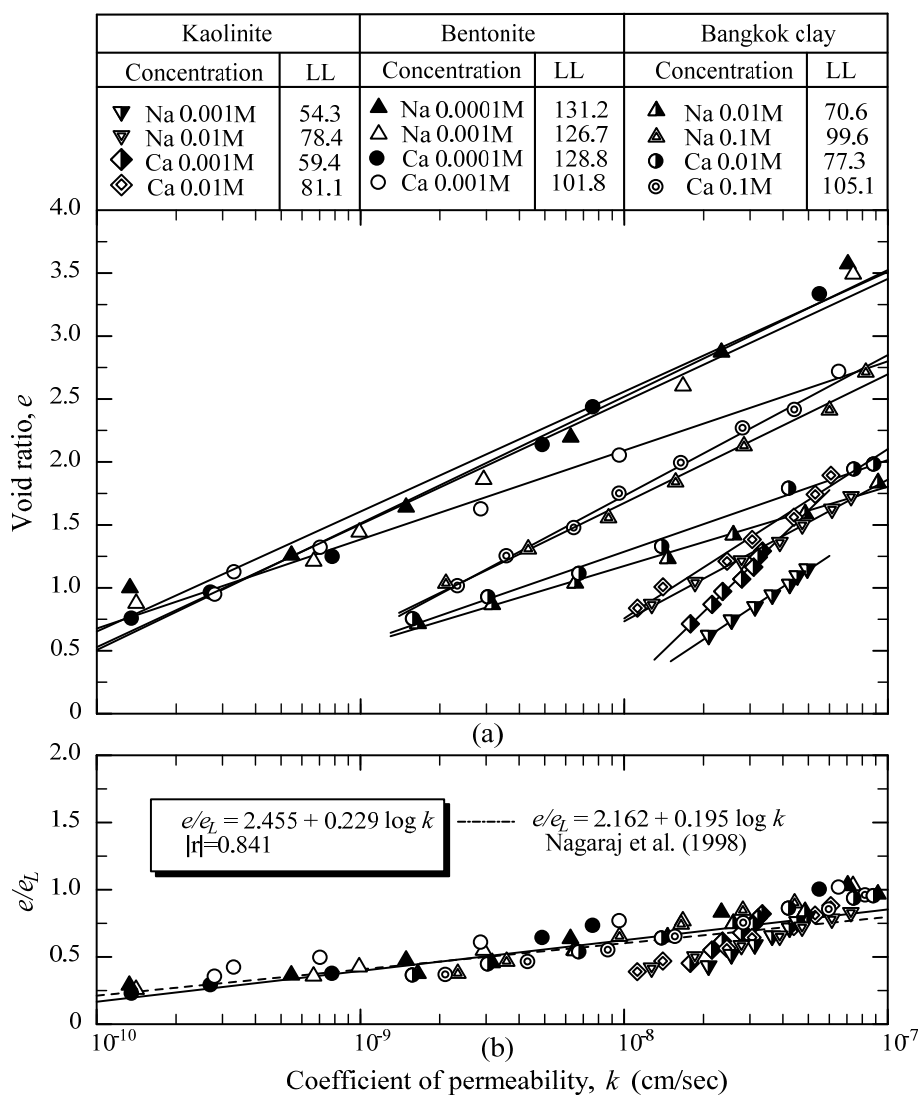


รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบการอัดตัวคายน้ำที่ทำนายด้วยสมการ 4.1 ถึง 4.4 สำหรับดินชนิดต่าง ๆ กับผลจากการวัดจริงของ Burland (1990)

4.7 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และกราฟความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและ $\log k$ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{e}{e_L} = 2.455 + 0.229 \log k \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.33 a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

b) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ
ดินคาโอลิไนต์ ดินเบนโทไนต์ และดินเหนียวกรุงเทพ

สำหรับดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำเท่ากัน แต่อัตราส่วนโพรงมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าช่องทางการไหลของน้ำ ซึ่งถูกควบคุมโดยแฟบริคของดินมีลักษณะเหมือนกัน แม้ว่าอัตราส่วนโพรงจะมีค่าแตกต่างกัน Nagaraj et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2007) ได้แสดงให้เห็นว่าแฟบริคของดินถูกควบคุมโดยอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ดังนั้น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อัตราส่วนโพรงใด ๆ น่าจะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้า และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน 3 ชนิด เมื่อเปลี่ยนแปลงความแรง และความเข้มข้นของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ทั่วไปสำหรับใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายนํ้า และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินต่อคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติการอัดตัว

เมื่อความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้น ค่าพิกัดเหลว ดัชนีสภาพพลาสติก อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ แอคติวิตี และขนาดของเม็ดดินของดินเหนียวกรุงเทพฯเพิ่มขึ้น ดินเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลดลงซึ่งคล้ายกับดินคาโอไลไนท์ การเพิ่มความเข้มข้น และชนิดของประจุบวกน่าจะทำให้ดินเกิดการจับเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย (Flocculation) มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมนํ้า และกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น ดินจึงทึบน้ำมากขึ้นทำให้นํ้าไหลผ่านดินได้ไม่สะดวก อย่างไรก็ตามพิกัดพลาสติกของดินเหนียวทุกชนิดไม่ได้รับอิทธิพลจากประจุบวกของของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

5.1.2 อิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างต่อคุณสมบัติพื้นฐาน

การเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้ค่าพิกัดเหลว ดัชนีสภาพพลาสติก และขนาดของเม็ดดินของดินเหนียวทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมตัวอย่างแบบเปียก อย่างไรก็ตามแอคติวิตี และพิกัดพลาสติกมีความแตกต่างกัน้อยระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้ง

5.1.3 สมการทำนายเส้นสถานะเนื้อแท้

กราฟการอัดตัวคายนํ้าของดินบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง สามารถทำนายโดยใช้ดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง (I'_v) เทียบกับอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวด้วยสมการที่ 4.2

$$I'_v = 0.029 \log \sigma_v'^3 - 0.112 \log \sigma_v'^2 - 0.733 \log \sigma_v' + 1.427 \quad (4.2)$$

เมื่อ I'_v สามารถประมาณได้จากสมการ 4.1

$$I'_v = \left(\frac{e - e_{50}}{e_{50} - e_{1000}} \right) \quad (4.1)$$

โดย e_{50} และ $e_{50} - e_{1000}$ ประมาณได้จากสมการ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$e_{50} = 0.125e_L^3 - 0.727e_L^2 + 2.265e_L - 1.059 \quad (4.3)$$

$$e_{50} - e_{1000} = 0.203e_L^3 - 1.185e_L^2 + 2.864e_L - 1.889 \quad (4.4)$$

แบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อใช้ทำนายกราฟการอัดตัวของดินเหนียว 6 ชนิด ที่มีอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวต่างกัน ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงอย่างมาก

5.1.4 สมการทำนายสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง สามารถทำนายโดยเทียบกับอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวด้วยสมการที่ 4.7 ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับสมการที่เสนอโดย Nagaraj et al., 1998 อย่างมาก

$$\frac{e}{e_L} = 2.455 + 0.229 \log k \quad (4.7)$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วิธีการทำนายกราฟการอัดตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) หาค่าอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว (e_L) จากพิกัดเหลว
- 2) จากความสัมพันธ์ระหว่าง e_{50} & e_L และ $e_{50} - e_{1000}$ & e_L (สมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ) คำนวณหาค่า e_{50} และ $e_{50} - e_{1000}$

- 3) จากดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง (สมการที่ 4.1) แทนค่า e_{50} และ $e_{50} - e_{1000}$ จากข้อ 2)
- 4) อาศัยสมการที่ 4.2 คำนวณหาอัตราส่วนโพรงที่ความเค้นประสิทธิผลใด ๆ โดยการแทนค่าความเค้นประสิทธิผล และดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง

5.2.2 วิธีการประมาณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

มีขั้นตอนดังนี้

- 1) หาค่าอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวและอัตราส่วนโพรงสนามของดิน (e_0) จากพิกัดเหลวและความชื้นสนามตามลำดับ
- 2) อาศัยสมการที่ 4.7 คำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยการแทนค่าอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว และอัตราส่วนโพรงสนามของดิน จากข้อ 1)

5.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย

แบบจำลองที่นำเสนอสามารถใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินเหนียวทั่วไป แต่การเตรียมดินตัวอย่างสำหรับทดสอบพิกัดเหลวควรใช้ความชื้นสนามของดิน

5.2.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

ปัจจุบันที่ราบลุ่มภาคกลางได้รับผลกระทบอย่างมากจากน้ำเสียจากครัวเรือน แหล่งอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบที่อยู่ในรูปสารประกอบ จึงควรมีการศึกษาอิทธิพลของประจุลบ และสารประกอบต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- เชิดชนินทร์ หมคมลทิน, พานิช วุฒิพฤกษ์ และเสกสรรค์ โมทาร์ตัน. 2547. **คุณสมบัติเคมีฟิสิกส์ของดินเหนียวกรุงเทพ**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, น. GTE 123–126.
- เสกสรรค์ โมทาร์ตัน. 2546. **การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวกรุงเทพ**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 204 น.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข, รุ่งลาวัลย์ ราชัน. 2548. **ปฐพีกลศาสตร์**. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร. 298 น.
- สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน, แจ่มจันทร์ วิจารณ์, จงรักษ์ จันทร์เจริญสุข, ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, สุรพล รัตนโสภณ และสุเทพ ทองแพ. 2535. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, กรุงเทพมหานคร. 730 น.
- ASTM D 421-85, **Standard Practice for Dry Preparation of Soil Sample for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia.
- ASTM D 4318, **Standard Test Method for Liquid Limit Plastic Limit and Plasticity Index of Soil**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia.
- Bjerrum, L. (1973). **Problem of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soil**. Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.3, pp. 111 - 159.
- Bolt, G. H. (1956). **Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays**. Geotechnique, Vol. 6, No. 2, pp. 86 - 93.
- Burland, J. B. (1990). **On the compressibility and shear strength of natural clays**. Geotechnique, Vol. 40, No. 3, pp. 329 - 373.
- Casagrande, A. (1958). **Notes on the design of the liquid limit device**. Geotechnique, Vol. 8, No. 2, pp. 84 - 91.
- Das, B.M. (1985). **Advanced Soil Mechanics**. McGraw-Hill Book Co., New York.

- Egashira, K. and Ohtsubo, M. (1981). **Low swelling smectite in a recent marine mud of Ariake bay**. Soil Sci. Plant Nutr., Vol. 27, No. 2, pp. 205 - 280.
- Grim, R.E. (1968). **Clay Mineralogy**. 2d ed., McGraw-Hill Book Co., New York.
- Hang, P.T. and Brindley, G.W. (1970). **Methylene blue adsorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities**. Clay and Clay Min., Vol. 18, pp. 203 - 212.
- Hingston, F. J., Posner, A. M. and Quirk, J. P. (1972). **Anion adsorption by goethite and gibbsite**. J. Soil Sci., 23, pp. 177 - 193.
- Horpibulsuk, S. and Rachan, R. (2003). **Undrained strength characteristics of cement admixed clay**. Proc. 56th Canadian Geotechnical Engineering Conference, Manitoba, Canada.
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K. and Katkan, W. (2007). **Assessment of engineering properties of bangkok clay**. Geotechnique, Vol. 44, pp. 173 - 187.
- Jose, B. T., Sridharan, A. and Abraham, B. M. (1988). **A study of geotechnical properties of Cochin marine clays**. Marine Geotechnology, Vol. 7, pp. 189 - 209.
- Kenny, T. C., Moum, J. and Berre, T. (1967). **An experimental study of bonds in a natural clay**. Proc. Geotechnical Conf., Oslo, pp. 65 - 69.
- Leonards, G. A. and Altschaeffl, A. G. (1964). **Compressibility of clays**. J. Soil Mech. & Found. Div. ASCE, Vol. 90, pp. 33 - 155.
- Mitchell, J. K. (1973). **Influence of mineralogy and pore solution chemistry on the swelling and stability of clays**. Proc. 3rd Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, Vol. 2, pp. 11 - 25.
- Mitchell, J.K. (1993). **Fundamentals of Soil Behavior**. John Willey & Sons, Inc. New York.
- Mitchell, J. K. and Soga, k. (2005). **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Nagaraj, T. S. and Miura, N. (2001). **Soft Clay Behaviour - Analysis and Assessment**. A. A. Balkema, Rotterdam, the Netherland.
- Nagaraj, T. S., Pandian, N. S. and Narasimha Raju, P. S. R. (1994). **Stress state permeability relationship for overconsolidated clays**. Geotechnique, Vol. 44, No 2, pp. 349 - 352.
- Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy, B. R. (1986). **A critical reappraisal of compression index equations**. Geotechnique, Vol. 36, No. 1, pp. 27 - 32.

- Nagaraj, T.S., Vatasala, A. and Srinivasa Murthy, B.R. (1990). **Discussion on change in pore size distribution due to consolidation of clays.** by F.J. Griffith and R.C. Joshi, Geotechnique, Vol.40, No.2, pp. 303 - 305.
- Norman, L.E.J. (1958). **A Comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness.** Geotechnique, Vol. 8, pp. 79-83.
- Olson, R. E. and Mesri, G. (1970). **Mechanisms controlling compressibility of clay.** J. Soil Mech. & Found. Div. ASCE, Vol. 96, No. 6, pp. 1863-1876.
- Olson, R. E. and Mesri, G. (1971). **Consolidation characteristics of montmorillonite.** Geotechnique 21, No. 4, pp. 341-352.
- Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T. and Bergado, D.T. (2000). **Mineralogy and chemical and their correlation with geotechnical index properties of Bangkok clay : Comparison with Ariake clay.** Soil and Foundation, Vol. 40, No. 1, pp. 11-21.
- Prakash, K. and Sridharan, A. (2004). **Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 2, pp. 220-225.
- Rao, G., Sridharan, A. and Chandrakaran, S. (1989). **Influence of drying on the liquid limit behavior of a marine clay.** Geotechnique. Vol. 39, No. 4, pp. 715-719.
- Silva, A.J. (1974). **Marine Geomechanics.** Overview and Projections, Deep Sediments Ed. Inderbitzen, Plunum Publications, pp. 45-76.
- Skempton, A.W. and Northey, R.D. (1953). **The sensitivity of clays.** Geotechnique, Vol 3, pp. 30-53.
- Soralump, S. (1996). **Evaluation of Design Mix Procedures for Soil-Cement With and Without Additive for Application to the Reconstruction of the Bangna-Trad Highway Improved With Deep Mixing Method.** M.S. Thesis. Asian Institute of Technology, Thailand.
- Sowers, G. F., Vesic, A. and Grandolfi, M. (1959). **Penetration test for liquid limit.** Proceedings symposium on Atterberg limits. ASTM, Special Technical Publication, No. 254, pp. 216-224.
- Sridharan , A. and Rao, G. (1973). **Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept.** Geotechnique, Vol.23, No.3, pp. 359 - 382.

- Sridharan, A. and Rao, G. (1975). **Mechanisms controlling the liquid limit of clays**. Proc. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul, Vol. 1, pp. 65 - 75.
- Sridharan, A., Rao, G. and Srinivasa Murthy, B. R. (1986). **Liquid limit of montmorillonite soils**. ASTM, Geotechnical Testing J., Vol. 9, No. 3, pp. 156 - 159.
- Sridharan, A., Rao, G. and Srinivasa Murthy, B. R. (1988). **Liquid limit of kaolinitic soils**. Geotechnique, Vol. 38, No. 2, pp. 191 - 198.
- Uddin, K. (1995). **Strenth and Deformation Characteristics of Cement-Treated Bangkok Clay**. D.Eng. Dissertation No. GT-94-1, Asian Institute of Technology, Thailand.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม, สุขสันต์ หอพิบูลสุข และเชิดชนินทร์ หอมดมลทิน. 2550. กลไกควบคุมลักษณะการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 (The 12th National Convention on Civil Engineering), GTE 039, โรงแรมอมรินทร์ลาดุล จ. พิษณุโลก. 2-4 พฤษภาคม 2550.

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์เดช ยังสุขเกษม เกิดเมื่อวันที่ 10 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2519 ณ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนางรอง อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ ในปีการศึกษา 2536 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ในปีการศึกษา 2542 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในบริษัทรับเหมาก่อสร้าง ตำแหน่งวิศวกรภาคสนามเป็นเวลา 2 ปี ต่อจากนั้นได้ทำงานทางสายงานวิชาการ ตำแหน่งอาจารย์ วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ เป็นเวลา 2 ปี ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2546 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสนเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 2 รายวิชา คือ (1) ปฐพีกลศาสตร์ (2) ปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง